

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANAL MİKROSKOBİ UYGULAMASI İÇİN
OTOMATİK LAM YÜKLEYİCİ

Fatih Mehmet SARAÇ

Temmuz, 2013
İZMİR

SANAL MİKROSKOBİ UYGULAMASI İÇİN OTOMATİK LAM YÜKLEYİCİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Fatih Mehmet SARAÇ

**Temmuz, 2013
İZMİR**

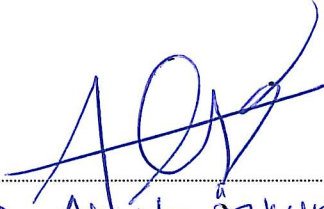
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

FATİH MEHMET SARAÇ, tarafından YRD. DOÇ. DR. GÜLESER KALAYCI DEMİR yönetiminde hazırlanan “SANAL MİKROSKOBİ UYGULAMASI İÇİN OTOMATİK LAM YÜKLEYİCİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Güleser K. Demir

Yönetici



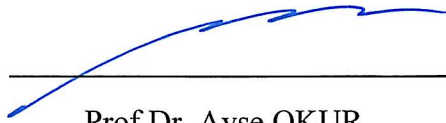
Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZKURT

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Gökalep YILDIZ

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez Çalışması boyunca bilgi ve deneyimleriyle, içtenlikle yol gösteren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Güleser KALAYCI DEMİR'e, her türlü desteklerinden dolayı müdürüm Doç. Dr. Abdurrahman KARABULUT'a, beni bugünlere getiren aileme ve her daim yanımda olan eşim Aşina SARAÇ'a teşekkür ederim.

Fatih Mehmet SARAÇ

SANAL MİKROSKOBİ UYGULAMASI İÇİN OTOMATİK LAM YÜKLEYİCİ ÖZ

Sanal mikroskop, mikroskop altında bulunan cam lamın incelenme deneyimini bilgisayar ortamında sanal olarak veren sistemlerdir. Sanal mikroskobinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için lamaların, başka bir kullanıcıya ihtiyaç duyulmadan lam kasetinden alınıp, mikroskop objektifi altına yerleştirilmesi gerekmektedir. Otomatik lam yükleyicisi, programlanmış konumdaki lamı, lam kasetinden hassas şekilde alıp, mikroskopun lam sehpasına koymalı ve lam üzerindeki örneğin görüntüsü alındıktan sonra lamı ilk konumuna geri bırakmalıdır.

Bu tezde, bu tür otomatik lam yükleyicisi robot sisteminin mekanik ve elektronik tasarımı yapılarak entegrasyon gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan robot, silindirik düzenleme sahip, ilk eklemi dönel, ikinci eklemi birinci eklemeye paralel ve prizmatik, üçüncü eklemi ise ikinci eklemeye paralel ve prizmatiktir. Döner olan ilk ekseninde sonsuz vida-dişli sistemi tercih edilmiş olup diğer iki ekseninde ise motordan gelen döner hareket doğrusal harekete bilyalı vida sistemi ile çevrilmiştir. Denetim sistemi olarak yaygın ve efektif bir kontrol algoritması olan kapalı döngü PID (Oran-İntegral-Türev) kontrol algoritması kullanılmıştır. TI F28335 (DSP) mikrokontroller kartı kullanılarak PID kontrolcü ve diğer ilgili giriş çıkış sinyalleri elde edilmiştir. Programlama ortamı olarak Matlab Simulink ortamı seçilmiştir. Mekanizmamızın uç işlevcisinin konumu verilip, verilen konuma göre motorların hareket miktarı, ters kinematik ve dişli denklemleri ile hesaplanmıştır ve uç işlevcisinin verilen konumuna ulaşma davranışı incelenmiştir. P, I, D katsayılarının etkileri araştırılmış ve ilgili sonuçlar alınmıştır. İstenen konum ve ulaşılan konum değerleri karşılaştırıldığında yapılan hatanın %2 değerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sanal mikroskopi, otomatik lam yükleyici, DC motor, enkoder

AUTOMATIC SLIDE LOADER FOR VISUAL MICROSCOPY APPLICATION

ABSTRACT

Virtual microscopy is the system which gives the experience of examining the slide under the microscope virtually. To use virtual microscopy efficiently the slides must be taken from the slide cassette and placed under the stage of the microscope without any need of a user. Automatic slide loader must take the slide sensitively whose location was programmed previously and place it at its first location back after the images of the slide are captured.

In this thesis the mechanical and electronic design of an automatic slide loader robotic system is performed and integrated. The proposed robot is in a framing of cylindrical-coordinate (RPP) whose first joint is pivoted and the second joint is prismatic and parallel to the first one and the third one is prismatic and parallel to the second one. In the first axis a worm gear system is preferred and in the two other axes the rotary motion is translated to the linear motion with ball screw system. As a control system widely and effectively used PID (Proportional-Integral-Derivative) control algorithm is used. By using TI F28335 microcontroller card the PID controller and the other related input and output signals are obtained. As the programming environment Matlab Simulink is preferred. After the gripper position of the mechanism is provided, the amount of movement and the inverse kinematic and gear equations are calculated. The response behaviour of the gripper to its desired position is also examined. The effects of PID coefficients are investigated and the related results are obtained. According to the comparison between the desired and measured positions the error is calculated less than 2%.

Keywords: Automatic slide loader, Visual microscopy, DC motor, Encoder

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x

BÖLÜM BİR-GİRİŞ..... 1

BÖLÜM İKİ – MEKANİK TASARIM 7

2.1 Giriş	7
2.2 Bilyalı Vidalı Mil.....	10
2.3 İleri Kinematik Hesabı.....	12
2.4 Ters Kinematik Hesabı.	14
2.5 Jakobiyen Matrisinin Hesabı.....	17
2.6 Motor Seçimi ve Tork Değerleri	21
2.7 Limit Anahtarları.....	23
2.8 Mekanik Limitler	23

BÖLÜM ÜÇ – ELEKTRONİK TASARIM..... 24

3.1 Enkoder	24
3.2 Kontrolcü Kartı	26
3.3 eQEP	27
3.4 Motor Sürücüleri	28
3.5 PWM	30
3.6 Lojik Çevirici	31

BÖLÜM DÖRT – KONTROL CU TASARIMI 32

4.1 Giriş.....	32
4.2 DC Motroun Matematiksel Modeli	34
4.3 Matlab Sistem Tanılama Aracı ile Motor Modelinin Bulunması.....	35
4.4 PID Kontrolcu	37
4.5 PID Katsayılarının Bulunması: Ziegler ve Nichols Yöntemi.....	37
4.5.1 Birinci Eksendeki PID Kontrolcünün Katsayılarının Ayarlanması.....	39
4.5.2 İkinci Eksendeki PID Kontrolcünün Katsayılarının Ayarlanması.....	39
4.5.3 Üçüncü Eksendeki PID Kontrolcünün Katsayılarının Ayarlanması	40

BÖLÜM BEŞ – MATLAB SIMULINK ORTAMINDA SİSTEMİN GERÇEKLENMESİ 42

5.1 Simulink Modeli.....	42
5.1.1 PID Kontrolcü Tasarımı	42
5.1.2 Simulink Modeline Ters Kinematik Hesaplarının Eklenmesi.....	43
5.2 M- File Komut Dosyası.....	45
5.3 Kullanıcı Arayüzü	45
5.4 Sonuçlar	46
5.4.1 Z Ekseninde Hareketin İncelenmesi	46
5.4.2 X ve Y Ekseninde Hareketin İncelenmesi	49

BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR VE GÖZLEMLER..... 51

KAYNAKLAR 53

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Silindirik robot çalışma alanı	3
Şekil 1.2 Hudson Robotics The <i>PlateCrane EX</i>	3
Şekil 1.3 Uygulanan sistemin blok diyagram gösterimi	5
Şekil 2.1 Tasarlanan Robotun izometrik görünüşü	7
Şekil 2.2 Birinci ve ikinci eksendeki motorların mekanik bağlantıları	8
Şekil 2.3 Çizimi yapılan mekanizmanın görünüşü	9
Şekil 2.4 Gerçeklenen sistemimizin görüntüsü	10
Şekil 2.5 Bilyalı vidanın çalışması	11
Şekil 2.6 Otomatik lam yükleyici robotun eksen sistemi	12
Şekil 2.7 Enkoderli motor	21
Şekil 2.8 Limit anahtarı.....	23
Şekil 3.1 Mutlak enkoder	24
Şekil 3.2 Artımlı enkoderin iç yapısı	25
Şekil 3.3 Dönüş yönüne göre enkoderden gelen sinyal	25
Şekil 3.4 Kontrolcü Kartı	27
Şekil 3.5 Simulinkte eQEP register ayarları	28
Şekil 3.6 VNH3SP30 ve TB6612FNG motor sürücülerini	29
Şekil 3.7 PWM sinyali duty cycle	30
Şekil 3.8 Lojik çevirici	31
Şekil 4.1 James Watt'ın toplu hız düzenleyicisi	32
Şekil 4.2 Geri beslemeli motor kontrol şeması	33
Şekil 4.3 DC motorun eşdeğer devresi.....	34
Şekil 4.4 Matematiksel modelin giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi vermesi	35
Şekil 4.5 Sistem tanılama aracında veri giriş ekranı	36
Şekil 4.6 Ziegler Nichols yönteminde P_u salınım periyodu	38
Şekil 4.7 İlk eksendeki motorda $K_p=4$ değerinde olduğunda meydana gelen salınımlar	39

Şekil 4.8 İkinci eksenindeki motorda $K_p=8$ değerinde olduğunda meydana gelen salınımlar	40
Şekil 4.9 Üçüncü eksenindeki motorda $K_p=8$ değerinde olduğunda meydana gelen salınımlar	41
Şekil 5.1 Simulink DC motor kontrol modeli	42
Şekil 5.2 PID kontrol algoritmasının simulink modeli	43
Şekil 5.3 X ve Y eksenindeki ters kinematik hareketinin simulink modeli	44
Şekil 5.4 Matlab kullanıcı arayüzü görüntüsü.....	46
Şekil 5.5 Z eksen konumlama davranışı ($P= 0,01$)	47
Şekil 5.6 Z eksen konumlama davranışı ($P= 1$)	47
Şekil 5.7 Z eksen konumlama davranışı ($P= 1, I=0,5$).....	47
Şekil 5.8 Z eksen konumlama davranışı ($P= 1, I=0,2$).....	48
Şekil 5.9 Z- eksen konumlama davranışı ($P= 1, I=0,05, D= 0,4$)	48
Şekil 5.10 X ve Y koordinatları konumlama davranışı ($P=0,1$)	49
Şekil 5.11 X ve Y koordinatları konumlama davranışı I ($P=1, I=0,2$)	50

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 D-H tablosu.....	13
Tablo 2.2 Bir robotun genel açısal ve doğrusal hızlarına ait denklemler	18
Tablo 3.1 Kullanılan sürücülerin teknik verileri	29
Tablo 4.1 Ziegler-Nichols yöntemi ile P, I, D katsayılarının ayarlanması	38
Tablo 5.1 Z ekseninde verilen komutla gerçekte ölçülen değerlerin Karşılaştırması	48
Tablo 5.2 X ve Y ekseninde verilen komutla gerçekte ölçülen değerlerin karşılaştırması	50

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Sanal mikroskop, mikroskop altında bulunan cam lamın incelenme deneyimini bilgisayar ortamında sanal olarak veren sistemlerdir (Ferreira ve diğer., 1997; Fontelo ve diğer., 2005). Sanal mikroskopi için cam lamdaki doku örneğinin örneklenerek çok fazla sayıda görüntüsünün elde edilmesi, bilgisayara aktarılması, görüntülerin bir bütün oluşturacak şekilde dikilmesi(/birleştirilmesi), işlenmesi, arşivlenmesi ve aynı zamanda da bir monitör ve tarayıcı arayıcılığıyla bu verinin incelenmesi sağlanmalıdır (Baş ve Demir, 2010). Dijital verinin incelenmesi (resimde gezinme, yakınlaştırma ve uzaklaştırma) kullanıcı ile etkileşimli olarak gerçekleştirilebilmekte dolayısıyla optik mikroskop altında cam lameli incelemeye benzer bir ortam sağlanabilmektedir. Sanal Mikroskopi sisteminin oluşturulması dört temel hedefe ulaşılmasını amaçlamaktadır. Bunlar; i) sanal mikroskobun tasarımı ve geliştirilmesi, ii) bilgisayara aktarılmış görsellerin arşivlendiği bir sanal mikroskopi web sitesi tasarlamak, iii) sanal mikroskobinin doğru teşhisler konmasında ilerleme sağlaması, iv) sanal lamaları arşivleyip iç web (intranet) aracılığıyla yerel vericilerle incelenmesini sağlamaktır (Fontelo ve diğer., 2005).

Sanal mikroskobinin temel avantajları aşağıda kısaca verilmiştir (M.Lundin ve diğer., 2004) .

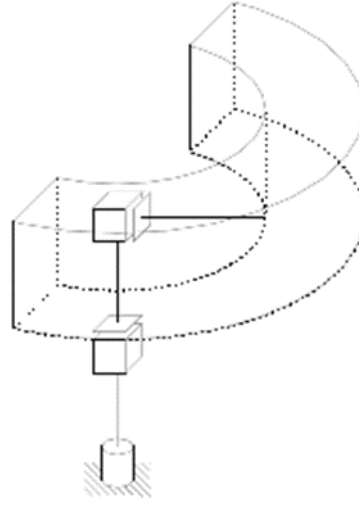
1. Örneklemin tüm resimleri, tüm kullanıcılar tarafından mikroskoba ihtiyaç duymadan farklı monitörlerde incelenebilir. Bu durum birlikte çalışma ortamını sağlamakta ve hasta/örnek odaklı tartışmaların çoğalmasına olanak sağlamaktadır.
2. Bilgisayara aktarılmış veriler ağlarda saklanabilmekte ve birçok kullanıcı tarafından paylaşılabilmektedir. Nadir, benzersiz, tek veya küçük doku biyopsileri gibi türünün tek örneği olanlar ve tekrarı olmayacak, çoğaltılamayacak veya sınırlı örneğe sahip olmasından dolayı tekrar üretilmeyecek olan hasta materyalleri eğitimde ve çalışma ortamlarında kullanılabilir.
3. Hastanın elektronik medikal kaydını geliştirilmesi için doku örneklerinin kayıtları kalıcı olarak tutulabilmektedir.

4. Ekonomik olarak gelişmekte olan ülkelerde, mikroskop satın alım maliyetlerini azaltmakta ve sağlık eğitimcileri için değerli bir eğitim materyali sağlamaktadır.

Sanal mikroskopinin getirdiği avantajların yanında en büyük dezavantajlarından birisi yüksek satın alım maliyetidir. Bu dezavantajı ortadan kaldıracı amacı ile farklı ülke/gruplar ile işbirlikleri oluşturulmakta, cam lamellerin dijital ortama aktarılması belli merkezlerde yapılmasına rağmen dijital verinin kullanımı ortaklar arasında yapılan anlaşmalar ile geniş bir kullanıcı paylaşımı ile sağlanabilmektedir.

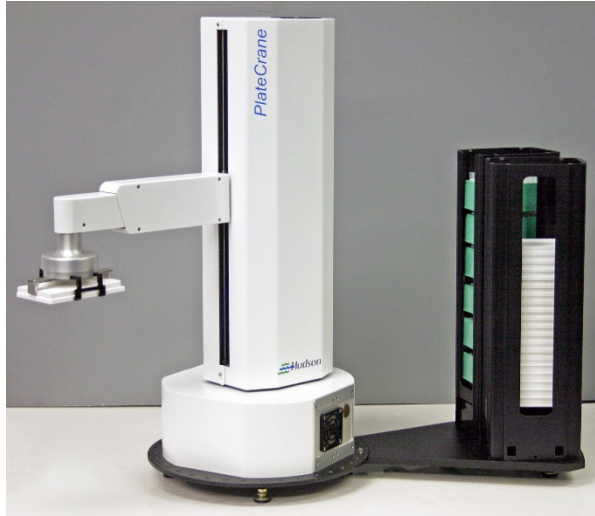
Lamellerin yoğun bir şekilde dijitalleştirilmesi gereken yerlerde veya uzaktaki bilgisayarın kullanıcısı tarafından seçilen lamların, başka bir kullanıcıya ihtiyaç duyulmadan lam kasetinden alınıp, otomatik olarak mikroskop objektifi altına yerleştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu noktada PID algoritmasıyla geliştirilmiş RPP tipi bir silindirik robot olan otomatik lam yükleyicisi ihtiyacımız olan teknolojiyi karşılamaktadır. Otomatik lam yükleyicisi programlanmış konumdaki lamı lam kasetinden hassas şekilde alıp, mikroskopun lam sehpasına koyar. Lam ile işlem bittikten sonra önceki yaptığı hareketin tersini yaparak lamı aynı konuma yine hassas bir şekilde bırakır. Mekanizmanın en önemli işlevi, uzaktan kontrol edilebilmesi ve lamın insan eliyle görebileceği muhtemel zararları en aza indirgeyip, genellikle büyük hassaslık gerektiren işlemlerin sorunsuzca yerine getirebilmesidir.

Bu çalışmada, zaman tasarrufu, iş gücü maliyetlerini azaltma ve insan hatasından kaynaklanan hataları en aza indirme amacı ile cam lamellerin görüntü alım sistemine otomatik aktarılmasını sağlayacak bir robot sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle, üzerindeki görüntüsü alınacak lam, lam kasetinden mikroskopun merceğinin altındaki numune tablasına otomatik olarak yerleştirilecek ve görüntü alımının tamamlanmasından sonra lam, lam kasetine geri konulacaktır. Otomatik lam yükleyici olarak adlandırdığımız bu robot hassas konumlama yapabilen 3 eksenli bir sisteme ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 1.1 Silindirik robot çalışma alanı (Spong ve diğer., 2005)

Önerilen robot, silindirik (RPP) düzenleme sahip, ilk eklemi dönel, ikinci eklemi birinci ekleme paralel ve prizmatik, üçüncü eklemi ise ikinci ekleme paralel ve prizmatik yapıdadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.2 Üç eksenli Silindirik robot (Hudson robotics the *plateCrane EX* overview, bt)

Şekil 1.2'deki robot mikro tabakaları taşımak için kullanılan Hudson Robotics firmasının ürettiği 3 eksenli silindirik bir robottur. Dikey ve yatayda biliyeli vidalarla motorun döner hareketini lineer harekete çevrilmektedir. Dikeyde masaya göre 10,9 cm ile 57,8 cm arasında hareket kabiliyeti vardır. Yatayda ise merkeze göre 30,5 cm ile 45,7cm arasında hareket edebilmektedir. Ayrıca eksenini etrafında 345°

dönembilmektedir. RS-232 seri haberleşme portu sayesinde bilgisayarla veri akışını sağlamaktadır.

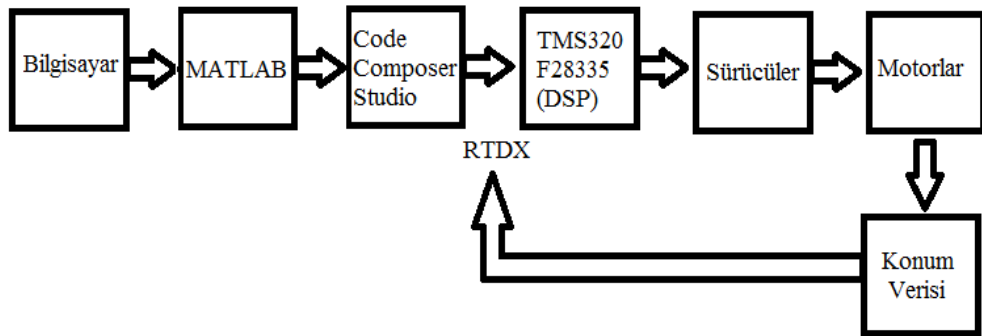
Silindirik düzenleme sahip bir robotun seçilmesinin temel nedenleri ilk eklemin dönel olmasından dolayı uç işlevcinin hızlı hareket etmesi, kartezyen robotlara göre daha büyük çalışma uzayına sahip olması ve kinematik denklemlerinden dolayı kontrolünün kolay olmasıdır (Bingül ve Küçük, 2005).

Bu tezde, robot kontrolü amacıyla yaygın ve efektif bir kontrol algoritması olan oransal-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative PID) yöntemi kullanılmıştır. Çıkış değeri olarak motor enkoderlerinden alınan konum bilgisi kullanılmış ve bu bilgi giriş referans değeri ile karşılaştırılmış, oluşan hata değerine göre PID kontrolöründen kontrol sinyali elde edilmiştir. Robot manipulatörlerinin kontrolünde, PID kontrolcülerinin sıklıkla kullanıldığı yapılarıdır (Bingül ve Küçük, 2008). Model bağımsız olması ve parametrelerinin basit ve bağımsız bir şekilde ayarlanabilmesi başlıca seçim nedenlerindendir. (Spong ve diğer., 2005) Bununla birlikte, PID kontrolcünde yer alan integral alıcı kapalı çevrim kontrol sisteminin bant genişliğini azaltmaktadır. Gürültü ve belirsizlik nedeni ile oluşan kalıcı durum hatalarını yok etmek için integral kazancının artırılması gerekir ki bu durum geçici durum davranışını kararsızlığa bile yol açabilecek şekilde kötü yönde etkilemektedir (Lewis ve diğer., 2004). Yazında, PID kontrolün asimtotik kararlılığını sağlamak için doğrusal PID kontrolcüsünün doğrusal olmayan PID kontrolcülerine dönüştürülmesini öneren çeşitli çalışmalar mevcuttur. Arimoto(1995), Konum hatasının doğrusal olmayan bir forma dönüştürülmesi, Sun ve diğerleri (2009), integral teriminin doğrusal olmayan bir fonksiyon ile satüre edilmesi, Alvarez-Ramirez (2003), girişin satüre edilmesi, Ortega ve diğer.(1985), filtrelenmiş konuma yeni bir integral teriminin eklenmesi, (Parra-Vega, 2003), değişken-yapı-kontrolcülerinin PID kontrol ile birleştirilmesi bu tür çalışmalara örnek olarak verilebilir.

Bu tezde, robot kontrolü amacıyla yaygın ve efektif bir kontrol algoritması olan PID algoritması kullanılmıştır. Kapalı döngü seçmemizin nedeni denetim

sisteminin girişinin çıkışından haberdar olmasıdır. Çıkış değeri motorun enkoderinden aldığımız konum bilgisidir. Bu motordan gelen konum değeri ile giriş değeri devamlı kontrol edilir. Aralarında fark olduğunda hata değeri oluşur ve hata değerine göre PID kontrolörden bir çıkış elde edilir. Bu çıkış bize sürücü yardımıyla motorumuza ne kadar gerilim uygulayacağımızı ve uygulanan gerilimin işaretini belirtir. Kontrol işlemi sonucunda motorumuz istenen tur sayısında döner.

Gerçekleştirilen lam yükleyici robot üzerinde Texas Instrument(TI)'in DSP TMS320F28335 experimenter kontrol kartı kullanılmıştır. 150 MHz hızına sahip işlemci, robota gelen komutlara yeterli sürede tepki verebilmiş ve kart üzerinde bulunan JTAG yardımı ile ayrı bir programlayıcı gerekliliğini ortadan kaldırmıştır. Kontrolcü kartı üzerinde bulunan yazılım TI Code Composer Studio ortamında değil Matlab Simulink ortamında hazırlanmış ve Matlab araçları ile otomatik olarak Code Composer Studio'da çalıştırılmıştır. Matlab yazılımı genel itibari ile üç kısımdan oluşmuştur. Bunlar M-file, Simulink, Guide'dır. Simulinkte yazılan kod, Matlab'ın kod çeviricisi yardımıyla C koduna çevrilmiştir. Bu C kodu derleyici olan Code Composer Studio (CCS)'da çalıştırılmış ve Code Composer Studio'da veriler DSP'in çalışacağı hexadecimal koduna dönüştürülüp programlanmıştır. Guide programın kullanıcı arayüzüdür. Arayüzden veri gönderimi ve gelen verilerin saklanması ve örüntülenmesi amacı ile hazırlanmıştır. Arayüz programının altında ise M-file kod kısmı çalıştırılmıştır.



Şekil 1.3 Uygulanan sistemin blok diyagram gösterimi

Tez çalışması süresince lam yükleme amaçlı tasarlanan robotik sistemin mekanik ve elektronik bileşenleri gerçekleştirilerek entegrasyonu sağlanmıştır. Sistem üzerinde

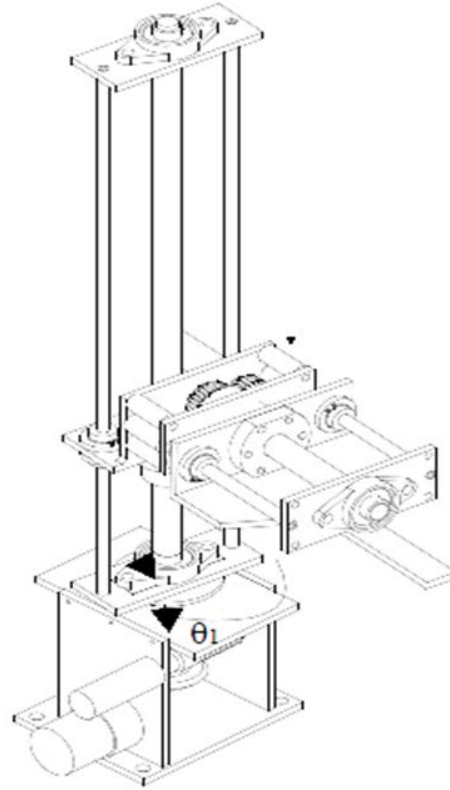
PID kontrol algoritması denenmiş ve tasarlanan robotun uç işlevcisinin istenen koordinata ulaşma performansı incelenmiştir. Bölüm 2’de gerçekleştirilen robotun mekanik tasarımı verilmiştir Bölüm 3, robotun elektronik tasarımı ve kullanılan eyleyici, sensör ve devreler hakkında açıklamalar içermektedir. Bölüm 4’de uygulanan kontrolör tasarlanmış ve Bölüm 5’te Matlab Simulink ortamında ilgili modeller ve uygulama sonuçları verilmiştir. Bölüm 6’da elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve sistemin geliştirilmesi üzerine yapılabilecekler tartışılmıştır.

BÖLÜM İKİ

MEKANİK TASARIM

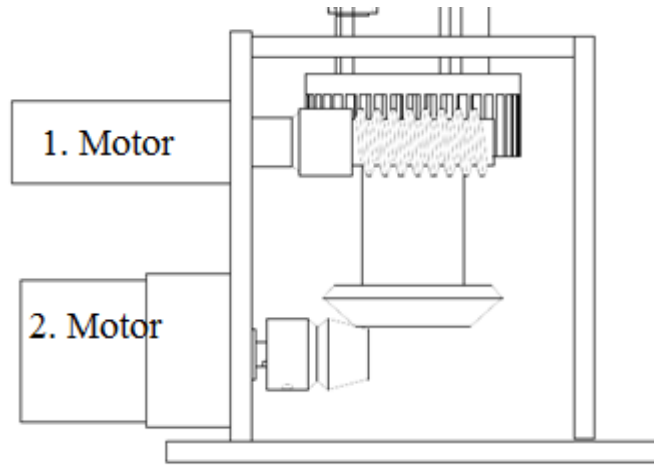
2.1 Giriş

Otomatik lam yükleyicinin oluşturulmasına mekanik parçaların tasarlanmasıyla başlanmıştır (Sandin, 2003). Mekanik sistemde yapılan hatalar, kontrol mekanizmasının kararlılığını ve performansını değiştireceğinden mekanik tasarıma özel önem verilmiştir. Tasarımda ana konstrüksiyon için seçilen malzemenin hafiflik, rijitlik ve yüke dayanım gibi özelliklerine dikkat edilmiştir. Tasarlanan mekanizma, Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Mekanizma, alüminyumdan yapılmıştır. Alüminyumun seçilmesinin nedeni hafif ve rijitlik özelliklerine sahip bir malzeme olmasıdır. Saç kalınlığı 5mm seçilmiştir. Saç kalınlığının daha da azaltılması sistemin daha hafif olmasına neden olmakla birlikte rijitliğinde azalma sonucu esneme oluşturabileceğinden tercih edilmemiştir.



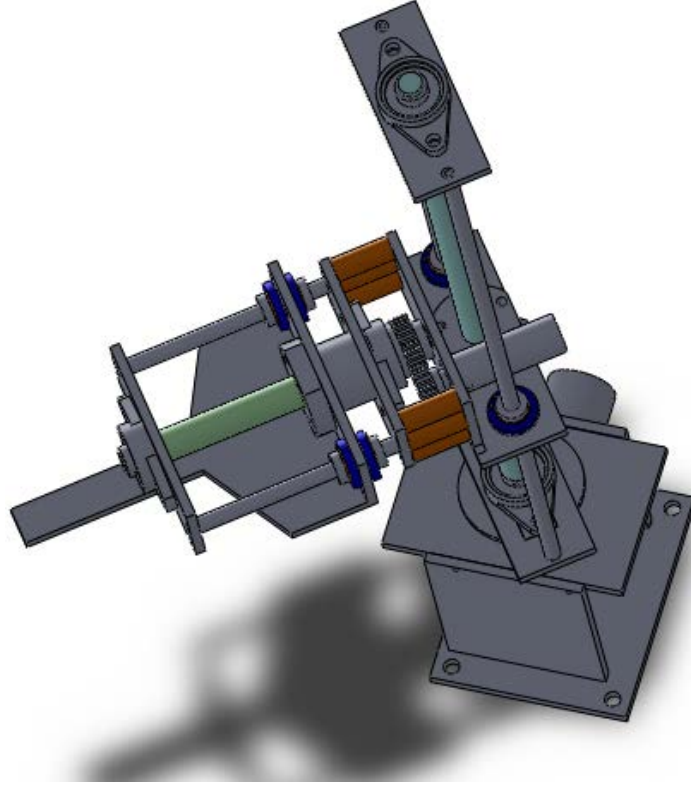
Şekil 2.1 Tasarlanan robotun izometrik görünüşü

Sistemde motordan gelen açısai hareketi, doğrusal harekete çevirmek için bilyalı vidalar kullanılmıştır. Sistemi hafifletmek için yanlarda kılavuzlanılan millerin çapı esneme meydana getirmeyecek derecede yeteri kadar küçük seçilmeye çalışılmıştır. Böylelikle, esnemenin yaratabileceği mekanizmanın hareket halinde iken kilitlenmesi probleminden kaçınılmıştır. Mekanizmada 3 adet motor kullanılmıştır. Aşağı yukarı yönde hareket edilmesini sağlayan motor en fazla yükü taşıyan motor olduğundan en güçlü, torku en yüksek motordur. İkinci eksendeki motor, bilyalı vida mekanizmasına bağlamadan önce motorun ilk kalkışta yenmesi gereken atalet momentini azaltması ve sistemin rahat kalkmasını sağlayan bir dişli sistemi üzerinden sisteme bağlanmıştır.



Şekil 2.2 Birinci ve ikinci eksendeki motorların mekanik bağlantıları

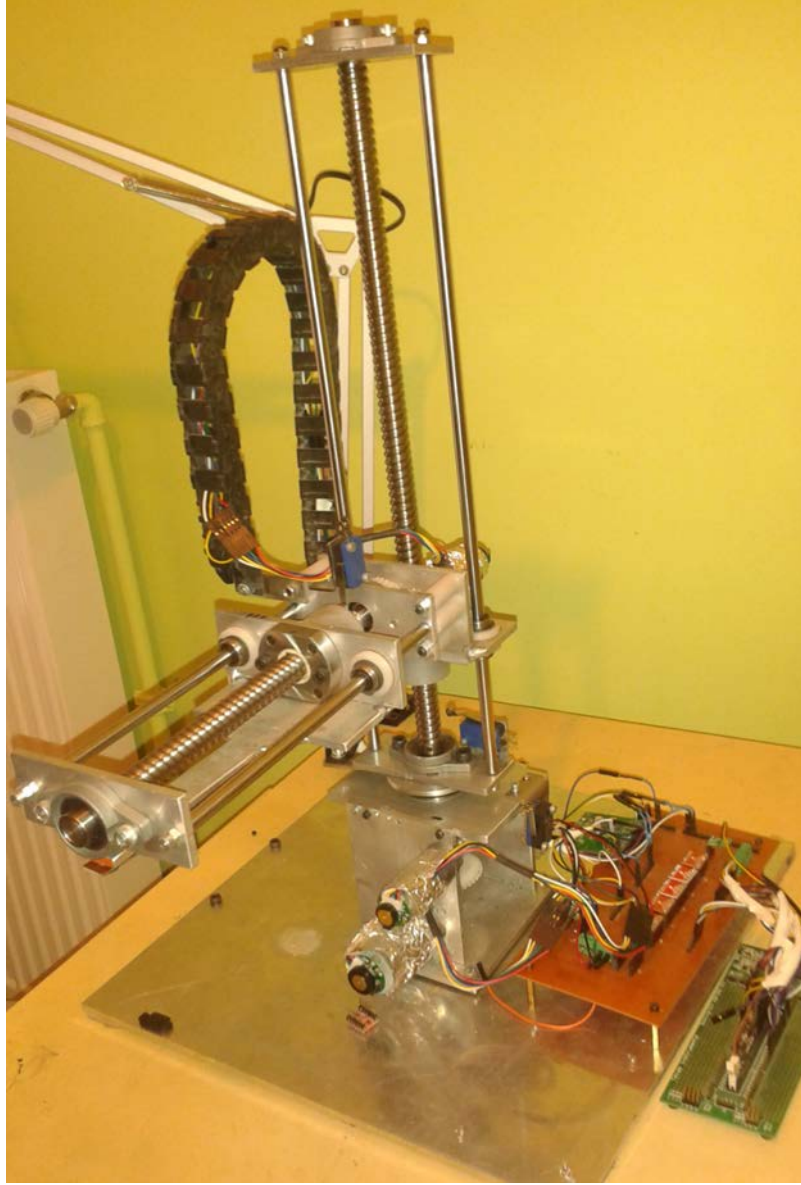
Birinci eklemdaki motor, mekanizmanın açısai hareket etmesini sağlamaktadır. Burada, motorun tahriki, sonsuz vida ile dişliye verilmiştir (Şekil 2.2). Sonsuz vida kullanılması en önemli nedeni dişliden ters hareket geldiğinde mekanizmanın hareket etmemesi ve 1. eklemin kilitlenmesidir. Bu sayede sadece 1. motordan tahrik edildiğinde sadece birinci eklemin dönmektedir. Eğer sonsuz vida-dişli sistemi kullanılmasaydı, 2. motorun hareketinin 1. motorun hareketini etkilemesi nedeni ile 1. eklemden açısai hareketin oluşabileceği de bu noktada göz önüne alınmıştır.



Şekil 2.3 Mekanizmanın 3 boyutlu CAD çizimi

İkinci motorun dikeyde yaptığı görevi, son motor yatayda yapmaktadır. Yatayda hareket ettiği için yerçekimi kuvvetine karşı iş yapılmadığından bu motorun torkunun çok yüksek olmasına gerek duyulmamaktadır.

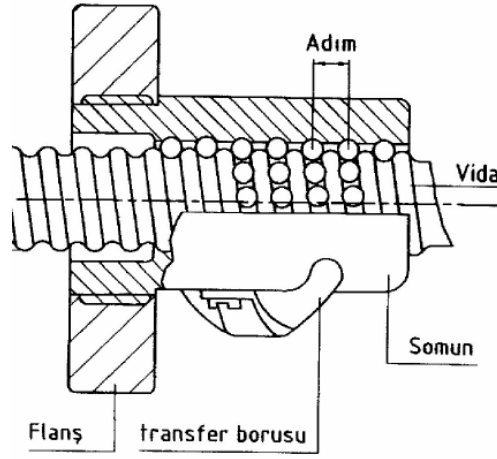
Tasarımı yapılan sistemin CAD çizimi Şekil 2.3'te ve gerçekleştirilen sistemin kendisi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Gerçeklenen sistemin görüntüsü

2.2 Bilyalı Vidalı Mil

Bilyalı vidalar, aslında vida somun sistemidir. Vida somun sisteminin dezavantajı olan sürtünmeyi azaltmak için hepsi aynı anda temas eden yağlanmış vida ile somun arasında olan bilyalardan oluşmuştur. Sürtünme ve kilitlenme ihtimali bilyalar sayesinde azalmaktadır (Şekil 2.5).

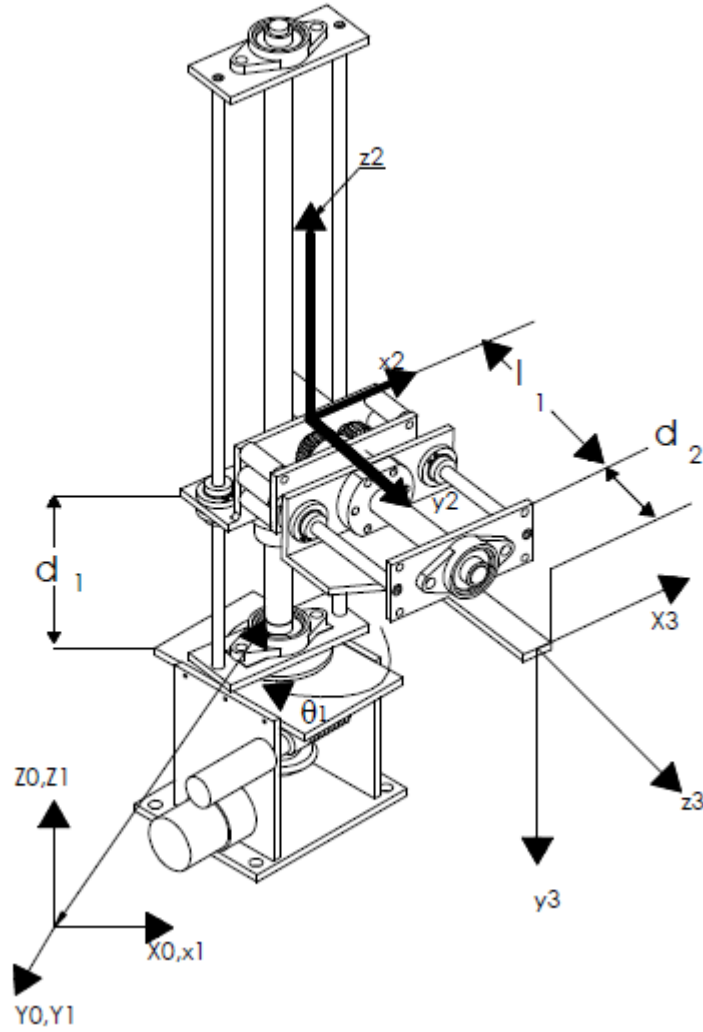


Şekil 2.5 Bilyalı vidanın çalışması (Mendi, 1999)

Bilyalı vidalı miller, açısal hareketi doğrusal harekete çeviren makine elemanlarıdır ve kendi eksenini etrafında dönmesini engellemek için doğru kılavuzlanmalıdırlar. Doğru kılavuzlanmazlarsa sistemin kilitlenmesine yol açarlar. Bilyalı vidalı miller ufak açısal hareketleri bile doğrusal harekete çevirdiği için çok hassastır. Bu durum, hassasiyet gerektiren sistemimizde bilyalı vidalara yönelmemizi sağlayan en önemli nedendir. Ayrıca bilyalar arasında boşluk olmayışı (backlash) bize konumlamada daha iyi hassasiyet sağlamıştır. Bilyalı vidalar hassasiyet gerektiren cnc, havacılık endüstrisi, nükleer reaktörler ve otomasyon transfer hatlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Mendi, 1999). Ayrıca, vida somun sistemlerinin dezavantajı olan sürtünmeyi yenerek düşük torklarda yüksek kuvvetli doğrusal hareket elde etmemizi sağlarlar. Sürtünmelerden dolayı meydana gelen aşınmayı ve ısınmayı azaltarak sistemin uzun ömürlü olmasını sağlarlar (Mendi, 1999). Bilyalı vida aynı zamanda redüktör görevi de yapmaktadır. Dişli sistemlerinde dişli oranıyla ayarlanan açısal hız-tork ilişkisi, bilyalı vida da hatve miktarıyla ayarlanabilmektedir. Maliyetin artması ve yüksek ivmeli hareket davranışına çok iyi uyum sağlayamaması bilyalı vida kullanımının oluşturduğu önemli dezavantajlardır.

2.3 İleri Kinematik Hesabı

İleri kinematik her eklemin sonraki ekleme göre açısının veya konumunun verilerek uç işlevcinin konumunun bulunması işlemidir. Bu çalışmada, kinematik hesaplamalar için Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi kullanılmıştır (Craig, 1989; Bingül ve Küçük, 2005). D-H tablosunun oluşturulması amacı ile eksenler Şekil 2.6’te gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir:



Şekil 2.6 Otomatik lam yükleyici robotun eksen sistemi

1. Sıfırıncı eksenle birinci eksen çakışık alınmıştır. Ekseni yerleştirirken, dönme ve doğrusal hareket yönleri Z ekseninde olacak şekilde yerleştirilmiştir.

2. Z eksenlerini yerleştirdikten sonra X eksenleri yerleştirilmiştir. X eksenini yerleştirirken sonraki Z eksenini göz önünde bulundurularak; X eksenini kendi ekseninde döndürdüğümüzde sonraki Z ekseninin doğrusal veya dönme hareketinin olduğu eksene denk gelmesi göz önüne alınmıştır.
3. Eksenleri yerleştirdikten sonra X ve Z eksenleri arasındaki uzaklık ve açıları D-H tablosuna yazılmıştır.

Robot sisteminin her eklemi için yukarıdaki açıklamalara göre yerleştirmeleri yapılarak D-H tablosu Tablo 2.1 'de verilen şekilde çıkarılmıştır. Burada, α_{i-1} , Z eksenini ile bir önceki Z eksenini arasındaki açı, a_{i-1} , Z eksenini ile bir önceki Z eksenini arasındaki uzaklık, d_i , X eksenini ile bir önceki X eksenini arasındaki uzaklık, θ_i , X eksenini ile bir önceki X eksenini arasındaki açıdır.

Tablo 2.1 D-H tablosu

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	Değişken
1	0	0	0	θ_1	θ_1
2	0	0	d_1	0	d_1
3	-90	0	$l_1 + d_2$	0	d_2

Her eklem için dönüşüm matrislerinin çıkarılmasında denklem (2.1)'de verilen dönüşüm matrisi kullanılmıştır.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

İlgili eksenlere göre elde edilen dönüşüm matrisleri sırası ile denklem (2.2), (2.3) ve (2.4)'te verilmiştir.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + l_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Bütün eklemlerin dönüşüm matrisini çıkardıktan sonra her bir eklemin dönüşüm matrisleri birbirleriyle çarpılmış ve denklem 2.5’de verilen ileri kinematik dönüşüm matrisi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} {}^0_3T &= {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + l_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & -\sin\theta_1(d_2 + l_1) \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & \cos\theta_1(d_2 + l_1) \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.4 Ters Kinematik Hesabı

Ters kinematik, uç işlevcinin konumuna göre her eklemin konum ve açısal değerlerinin bulunması işlemidir. Ters kinematik matrisini bulurken analitik çözüm yaklaşımı kullanılır. Her iki tarafı birinci eklemin dönüşüm matrisinin tersini ($[{}^0_1T]^{-1}$) bulup çarptığımızda aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$[{}^0_1T]^{-1} {}^0_3T = [{}^0_1T]^{-1} {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (2.6)$$

(2.6)'daki denklemde $[{}^0_1T]^{-1}{}^0_1T = 1$ olduğundan ilgili denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$[{}^0_1T]^{-1}{}^3_0T = {}^1_2T {}^2_3T \quad (2.7)$$

Dönüşüm matrisinin tersini bulmak için denklem 2.8 göz önüne alınmıştır. Burada R dönme matrisi P ise konum vektörüdür.

$$[{}^{i-1}_iT]^{-1} = \begin{bmatrix} [{}^{i-1}_iR]^T & -[{}^{i-1}_iR]^T {}^{i-1}_iP \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Bu denklem, birinci eklem için uygulanarak aşağıdaki eşitilik bulunmuştur.

$$[{}^0_1T]^{-1} = \begin{bmatrix} [{}^0_1R]^T & -[{}^0_1R]^T {}^0_1P \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Birinci eklem dönüşüm matrisinden dönme matrisi kısmı alınmış ve

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

olarak bulunmuştur.

Daha sonra aşağıda verilen işlemler izlenerek denklem 2.13 ile verilen dönüşüm matrisinin tersi elde edilmiştir.

$$[{}^0_1R]^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$-[{}^0_1R]^T {}^0_1P = - \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[{}^0_1T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Denklem 2.13, denklem 2.14'de kullanılmış ve 3_1T matrisi elde edilmiştir.

$$[{}^0_1T]^{-1}{}^3_0T = {}^3_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

=

$$\begin{bmatrix} r_{11}\cos\theta_1 + r_{21}\sin\theta_1 & r_{12}\cos\theta_1 + r_{22}\sin\theta_1 & r_{13}\cos\theta_1 + r_{23}\sin\theta_1 & p_x\cos\theta_1 + p_y\sin\theta_1 \\ r_{21}\cos\theta_1 - r_{11}\sin\theta_1 & r_{22}\cos\theta_1 - r_{12}\sin\theta_1 & r_{23}\cos\theta_1 - r_{13}\sin\theta_1 & p_y\cos\theta_1 - p_x\sin\theta_1 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Daha sonra ${}^3_1T = {}^1_2T {}^2_3T$ denkleminin kullanılması ile yine 3_1T matrisi (2.16)'da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$${}^3_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + l_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + l_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11}\cos\theta_1 + r_{21}\sin\theta_1 & r_{12}\cos\theta_1 + r_{22}\sin\theta_1 & r_{13}\cos\theta_1 + r_{23}\sin\theta_1 & p_x\cos\theta_1 + p_y\sin\theta_1 \\ r_{21}\cos\theta_1 - r_{11}\sin\theta_1 & r_{22}\cos\theta_1 - r_{12}\sin\theta_1 & r_{23}\cos\theta_1 - r_{13}\sin\theta_1 & p_y\cos\theta_1 - p_x\sin\theta_1 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + l_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Denklem 2.14 ve 2.16'da 4. sütunları (konum vektörü) birbirine eşitlenerek robotun değişkenlerinin uç işlevcinin konumuna göre değerleri elde edilmiştir. İlgili hesaplamalar aşağıda verilmiştir:

$$p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = 0 \quad (2.17)$$

$$p_x \cos \theta_1 = -p_y \sin \theta_1 \quad (2.18)$$

$$p_x = \frac{-p_y \sin \theta_1}{\cos \theta_1} \quad (2.19)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{p_x}{-p_y} \quad (2.20)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{p_x}{-p_y}\right) \quad (2.21)$$

$$p_y \cos \theta_1 - p_x \sin \theta_1 = (d_2 + l_1) \quad (2.22)$$

$$\frac{p_y \cos \theta_1^2 + p_y \sin \theta_1^2}{\cos \theta_1} = \frac{p_y}{\cos \theta_1} = (d_2 + l_1) \quad (2.23)$$

$$p_y = (d_2 + l_1) \cos \theta_1 \quad (2.24)$$

$$p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = 0 \quad (2.25)$$

$$p_x \cos \theta_1 + (d_2 + l_1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 = 0 \quad (2.26)$$

$$p_x \cos \theta_1 = -(d_2 + l_1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \quad (2.27)$$

$$p_x = -(d_2 + l_1) \sin \theta_1 \quad (2.28)$$

$$d_2 = \frac{p_x}{\sin(\tan^{-1}(\frac{p_x}{-p_y}))} - l_1 \quad (2.30)$$

Sonuç olarak,

$$p_z = d_1 \quad (2.31)$$

$$d_2 = \frac{p_x}{\sin(\tan^{-1}(\frac{p_x}{-p_y}))} - l_1 \quad (2.30)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(\frac{p_x}{-p_y}) \quad (2.21)$$

olarak bulunmuştur.

2.5 Jakobiye Matrisinin Hesabı

Jakobiye matrisi, vektör değerli fonksiyonların birinci derece kısmi türevlerini içeren bir matristir. Robot manipulatorlerinin hareketlerinin analizi ve incelenmesi için sıklıkla kullanılır (Spong ve diğer., 2005). Bu bölümde gerçekleştirilen lam yükleyici robot sistemi için Jakobiye matrislerinin elde edilişi verilmiştir.

Daha önce bulunan eklem dönüşüm matrisleri (T), dönme matrisi (R) ve konum matrisi (P) bütünlüğü sağlamak açısından aşağıda tekrar verilmiştir.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^0_1R = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^0_1P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + l_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2_3R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, {}^2_3P = \begin{bmatrix} 0 \\ d_2 + l_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Her bir eklem için açısal ve doğrusal hız, iteratif yöntemlerle bulunabilir. Hızları bulmak için ilk başta eklem dönel veya prizmatik oluşuna göre genel açısal ve doğrusal hız denklemleri yazılır. İlk eklemden son ekleme doğru açısal ve doğrusal hızlar bulunur ve her bulunan sonuç diğer eklemden kullanılarak son eklem hızları (${}^3\omega_3$ ve 3V_3) bulunur. Bulunan sonucun ana koordinat sistemine göre değerini bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır. Bu çalışmada geliştirilen robotun 3 hareket eksenini bulunduğundan $N=3$ 'dür.

Tablo 2.2 Bir robotun genel açısal ve doğrusal hızlarına ait denklemler

Eklem Tipi	Genel Doğrusal Hız Denklemi	Genel Açısal Hız Denklemi
Dönel	${}^{i+1}V_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^iV_i + {}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1})$	${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1})$
Prizmatik	${}^{i+1}V_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^iV_i + {}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + d_{i+1} \dot{Z}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}$	${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i\omega_i)$

Doğrusal hızlardan kaynaklanan jakobiyen matrisi,

$${}^0V_N = {}^0_N R {}^N V_N \quad (2.22)$$

$${}^0V_N = {}^0_3 R {}^3V_3 \quad (2.23)$$

'dir. Açısal hızlardan kaynaklanan jakobiyen matrisi ise

$${}^0\omega_N = {}^0_N R {}^N \omega_N \quad (2.24)$$

$${}^3\omega_3 = {}^0_3 R {}^3\omega_3 \quad (2.25)$$

‘dir. Denklemin çözülmesi için 0_1R ’nin transpozunun 1_0R olduğu ve de Z ekseninin dönel eksen olduğu bilgisi göz önüne alınmıştır.

Birinci eklem(i=0) için açısal hız, aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \cdot {}^{i+1}_i \hat{Z}_{i+1},$$

$${}^1\omega_1 = {}^1_0 R^0 \omega_0 + \dot{\theta}_1 \cdot {}^1_0 \hat{Z}_1 \quad (2.26)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\theta}_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Birinci eklem (i=0) için doğrusal hız, aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1})$$

$${}^1v_1 = {}^1_0 R ({}^0 v_0 + {}^0 \omega_0 \times {}^0 P_1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

İkinci eklem (i=1) için açısal hızı bulurken prizmatik olduğu için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \omega_i$$

$${}^2\omega_2 = {}^2_1 R^1 \omega_1$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

İkinci eklem (i=1) için doğrusal hız, aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) + d_{i+1} \cdot {}^{i+1}_i \hat{Z}_{i+1}$$

$${}^2v_2 = {}^2_1 R ({}^1 v_1 + {}^1 \omega_1 \times {}^1 P_2) + d_1 \cdot {}^2_1 \hat{Z}_2$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} + d_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Üçüncü eklem (i=2) için açısal hızı bulurken eklem prizmatik olduğu için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \omega_i$$

$${}^3\omega_3 = {}^3_2 R^2 \omega_2$$

$${}^3\omega_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Üçüncü eklem(i=2) için doğrusal hız, aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$${}^{i+1}\mathbf{v}_{i+1} = {}^{i+1}R({}^i\mathbf{v}_i + {}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{p}_{i+1}) + d_{i+1} \dot{\theta}_{i+1} \mathbf{Z}_{i+1}$$

$${}^3\mathbf{v}_3 = {}^3R({}^2\mathbf{v}_2 + {}^2\omega_2 \times {}^2\mathbf{p}_3) + d_2 \dot{\theta}_2 \mathbf{Z}_3$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & d_2 + l_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right] + d_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1(d_2 + l_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1(d_2 + l_1) \\ -\dot{d}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1(d_2 + l_1) \\ -\dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Ana koordinat sistemine göre doğrusal hız, aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$${}^0\mathbf{v}_3 = {}^0R {}^3\mathbf{v}_3$$

$$\begin{aligned} {}^0R &= {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 R = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{v}_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1(d_2 + l_1) \\ -\dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\cos\theta_1 \dot{\theta}_1(d_2 + l_1) - \sin\theta_1 \dot{d}_2 \\ \dot{d}_2 \cos\theta_1 - \sin\theta_1 \dot{\theta}_1(d_2 + l_1) \\ \dot{d}_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.34)$$

$${}^0\mathbf{v}_3 = \begin{bmatrix} -\cos\theta_1(d_2 + l_1) & 0 & -\sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1(d_2 + l_1) & 0 & \cos\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$${}^0\omega_N = {}^0R {}^N\omega_N$$

$$\begin{aligned}
{}^0\omega_3 &= {}^0R^3\omega_3 \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \\
{}^0\omega_3 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Bu durumda, Jakobiyen matrisi denklem 2.38’de belirtildiği şekilde elde edilmiştir. Burada, Jakobiyen matrisinin ilk 3 satırı doğrusal hızları belirtirken sonraki üç satır ise oluşan açısal hızlara ilişkindir.

$${}^3J(\theta) = \begin{bmatrix} {}^0v_3 \\ {}^0\omega_3 \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

$${}^3J(\theta) = \begin{bmatrix} -\cos\theta_1(d_2 + l_1) & 0 & -\sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1(d_2 + l_1) & 0 & \cos\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.38}$$

2.6 Motor Seçimi ve Tork Değerleri

Motor olarak pololu firmasına ait 2 farklı çeşit enkoderli redüktörlü D.C. motor seçilmiştir. İlk Motorun redüktör oranı 1:19, redüktör hızını 19 kat azaltırken; torkun 19 kat artmasına olanak sağlamaktadır. (Sürtünme kayıplarından dolayı torkta net 19 kat artım meydana gelemeyeceği göz önüne alınmıştır.) Katalog değerine göre 5A akımla, rotor dönme hareketi yapmıyorken 84 oz-inch (59 Ncm) tork üretmektedir. Bu tork değeri, dişli takımının kullanımı ile artırılmıştır. Yapılan test çalışmaları sırasında 5A akıma kalkışta ulaşılammış olup genellikle 1,45A akım elde edilmiştir.



Şekil 2.7 Enkoderli motor(Metal gearmotor, bt)

Motorun redüktörlü olması konumlamada hassasiyeti artırmaktadır. Bir turda 64 kare dalga üreten motor enkoderi, redüktör olması dolayısı ile $64*19=1216$ kare dalga üretmektedir. İkinci eklemdaki motor, yerçekimine karşı iş yaptığı için en yüksek akım çeken motordur. Bu motor, robotun 1,3 kg ağırlığı olan 3. eklemin yukarı ve aşağı yönde hareket etmesini sağlamaktadır.

Birinci motor ile üçüncü motor aynı özellikleri taşıyan motorlardır. İkinci motora göre tork ve hız değerleri daha düşüktür. Bu motorlardan ilki robotun açısall hareketini yaparken üçüncü motor ise lamı, lam kasetine yerleştiren 3. ekseninde görev yapmaktadır.

Motorun şaftından gelen dönme momenti olan tork ile kuvvet ilişkisi Denklem (2.32)'de gösterilmiştir. Burada d kuvvet kolu, F ise kuvvettir. Verilen torktan yüksek kuvvet elde etmek için kuvvet kolunun kısa tutulması gerekmektedir.

$$T=F.d \quad (2.39)$$

İkinci eksenindeki hareketi sağlayan motor, 12V gerilimle 500rpm hız ve 59Ncm tork üretmektedir. Motorda bu tork elde edilirken 1:19 redüktör kullanılmıştır. Bu tork değerinin anlamı 1 cm yarı çaplı şaftımıza teğet ekseninde 59 N kuvvet oluşmasıdır. Motordan elde edilen güç motor sürücülerle ayarlanabilmektedir. Yüksek yüklerde torkun düşük olması durumunda motor iş yapamaz duruma düşebilir. Dişli kullanımı sonucu motora aynı güç verildiğinde daha yüksek tork elde edilebilir.

$$P=w.T \quad (2.40)$$

Denklem (2.33)'de P güç, w açısal hız, T ise torkdur. Denklemden kolaylıkla görüldüğü gibi torkun artması açısal hızı azaltmaktadır. Mekanizmada torka ihtiyaç olduğu için ikinci ekleme 1/3 oranında, üçüncü ekleme 9/14 oranında dişli takımı

eklenmiştir. Dişli takımlarının avantajı ilk kalkışta motora binen atalet momentini azaltmasıdır.

2.7 Limit Anahtarları

Limit anahtarları robotun ilk çalıştırılmasında sıfır pozisyonunun bulunulmasında kullanılmıştır. Limit anahtarı aktif oluncaya kadar her eksendeki motorlar belli yönde döndürülmekte ve limit anahtarının aktif olduğu noktalar sıfır noktası olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra bu noktalara göre uç işlevci konumlandırılmaktadır.



Şekil 2.8 Limit anahtarı

2.8 Mekanik Limitler

İlk eksen de robotun bir turdan fazla dönmesini engellemek için mekanik limitler kullanılmıştır. Robotun bir turdan fazla dönmesi, 3. Ekseni hareket ettiren motorun kabloların kopmasına neden olabileceğinden hasar oluşmaması için mekanik limitlere ihtiyaç duyulmuştur.

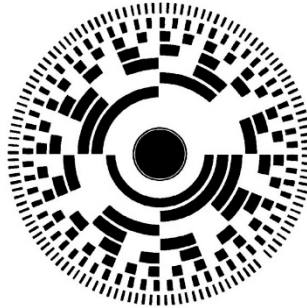
BÖLÜM ÜÇ

ELEKTRONİK TASARIM

3.1 Enkoderler

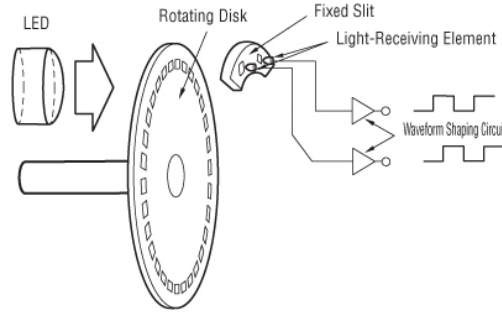
Enkoderler motordan konum, hız ve ivme gibi büyüklükleri ölçmek için kullanılırlar. Kullanılan enkoder 2 çeşittir. Bunlar mutlak enkoder ve artımlı enkoderlerdir.

Şekil 3.1’de 8 bitlik ikili mutlak enkoder görünmektedir. 8 bit çözünürlük nedeni ile bir turda $2^8=256$ darbe üretmektedir. Enkoderlerde, ikili kodlama sisteminden başka Gray ve BCD kodlama sistemleri de kullanılabilir. Gray kodunda her bir değişimde sadece bir rakam değiştiği için ölçümde hata olasılığı biraz daha düşüktür. Artımsal enkodere göre bir üstünlüğü, son konumunu saklamasıdır (Xie, 2003).



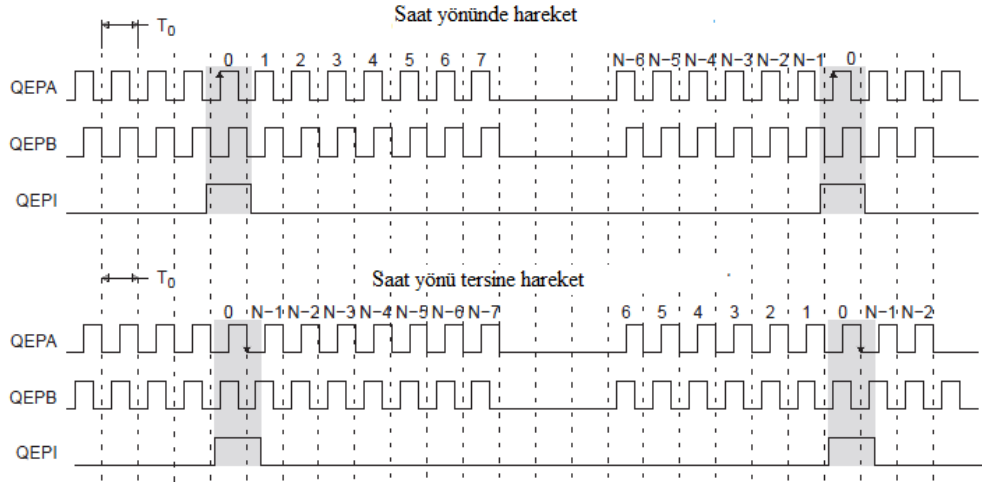
Şekil 3.1 Mutlak enkoder (Motor feedback option, 2010)

Şekil 3.2’de verilen artımlı enkoder örneğinde, iç yapıda yer alan diskin üzerinde delikler vardır. Bu deliklerin bir tarafında LED, diğer tarafında ışığı algılayan LDR olarak adlandırılan sensör vardır (Şekil 3.2). Deliklerden ışık geçtiğinde bir(On), ışık geçmediğinde ise sıfır (Off) olacak şekilde bir sinyal verir.. Oluşan bu sinyalin frekansından, motorun hızını ve sinyalin yükselen/düşen kenar sayısından sayısından motorun kaç derece döndüğü bulunur. Led kullanımı yerine farklı sensörler ile aynı sonucu veren farklı çeşitlerde artımlı enkoderler bulunmaktadır (Xie, 2003).



Şekil 3.2 Artımlı enkoderin iç yapısı (Servo motor glossary of terms, bt)

Bu çalışmada kullanılan motorda, artımlı enkoder bulunmaktadır ve led/ldr kullanımı yerine hall sensörü kullanmaktadır. Dolayısı ile enkoderde delikli disk yerine manyetik disk bulunmaktadır. 3,3V-20V arasında çalışmakta ve 90° faz farkına sahip 2 tane kanala sahiptir. İki kanalın faz farklı olması, dönüş yönünün bulunmasına olanak sağlamaktadır. Şekil 3.3 incelendiğinde, saat yönünde hareket yaparken QEPA sinyalinin yükselen kenarında QEPB'nın değeri sıfır, düşen kenarında ise birdir.



Şekil 3.3 Dönüş yönüne göre enkoderden gelen sinyal(TMS320x2833x eQEP reference guide, 2008)

Artımlı enkoderlerde, hız iki yöntemle ölçülebilir. Birincisinde, belli bir zaman aralığında aldığımız kare dalga sayısı sayılarak ölçüm yapılır. Yüksek hızlarda bu ölçüm tekniği kullanılır. İkinci yaklaşımda ise her yükselen veya düşen kenarda geçen zaman bulunularak hız hesaplanabilir.

$v(t)$, hız, $x(t)$, şimdiki konum, $x(k-1)$, bir önceki konum, T , belirlenen zaman, ΔX , belirlenen zamanda pozisyon değişimi, $t(t)$, şimdiki zaman, $t(t-1)$, bir önceki zaman, X , belirlenen konum, ΔT , belirlenen konumda zaman değişimi olmak üzere hız,

$$v(t) = \frac{x(t) - x(t-1)}{T} = \frac{\Delta X}{T} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir (TMS320x2833x eQEP reference guide, 2008). Bu denklemde zaman (T) sabit tutulup, yükselen/düşen kenar sayılarak ölçüm yapılmış;

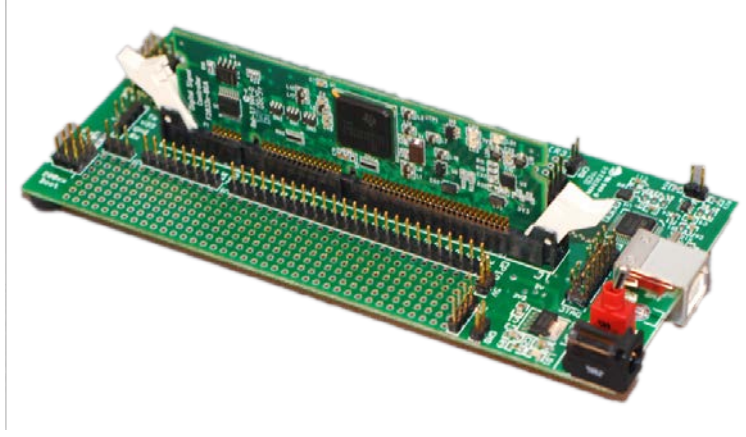
$$v(t) = \frac{X}{t(t) - t(t-1)} = \frac{X}{\Delta T} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de ise konum (X) sabit tutulmuş, bu açısal konumun ne kadar sürede tekrar elde edildiği üzerinden işlem gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, hız hesabı yapılırken Denklem (3.1) kullanılmış ve $T=0.1$ sn. alınmıştır. (Kontrol kartının ayarları yapılırken $\text{Cycle time} = \frac{20}{3} * 10^{-9}$ ve $\text{Unit time} = 15^6$ alınarak 0.1 sn set edilmiştir. $T = \text{Unit time} * \text{Cycle time}$)

3.2 Kontrol Kartı

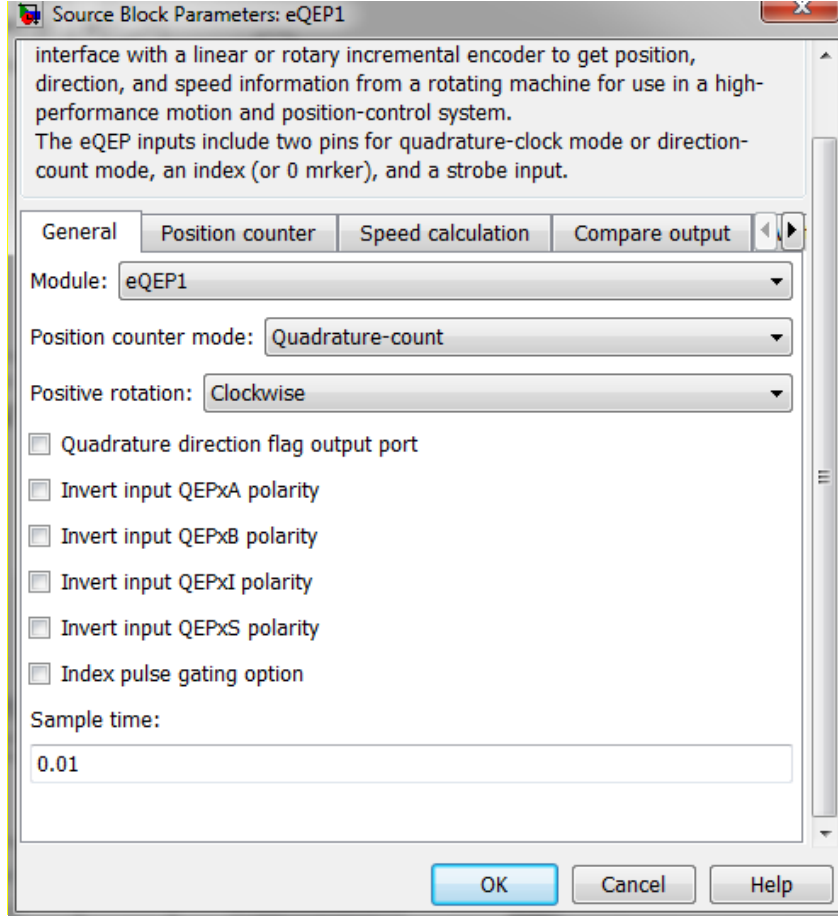
Sistemin kontrolörü olarak Texas Instrument’in (TI) TMS320F28335 kontrol kartı kullanıldı. Kart, 150 MHz. İşlemci, 34Kb ram, 6 pwm, 2 eQEP, 6 tane eCAP ayrıca on board JTAG’e sahiptir (TMS320F28335, Digital signal controllers (DSCs) data manual, 2007). 2 tane eQEP olmasından dolayı 2 motorun enkoder sinyalleri eQEP üzerinden ve 3. motorun enkoder sinyali ise kesme (interrupt) girişi üzerinden alınmıştır. Kesme geldiğinde enkoderin diğer faz sinyaline bakılıp 0 ve 1 olma durumuna göre yön tayini yapılmıştır).



Şekil 3.4 Kontrol kartı (Delfino experimenter kit, bt)

3.3 eQEP

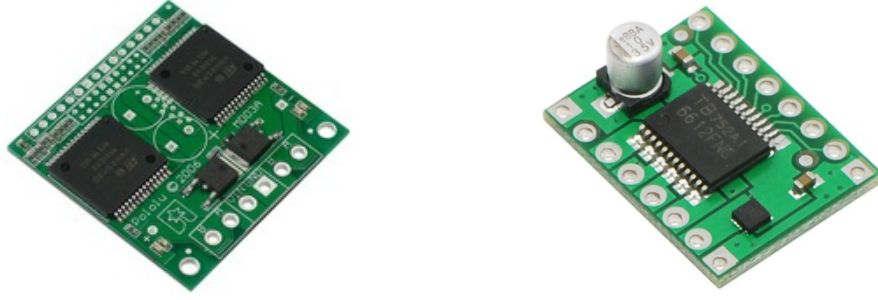
eQEP bloğundaki menüden register ayarları yapılır. Register ayarları değiştirilerek eQEP girişleri isteğimiz doğrultusunda kullanılır. Qadrature modunda eQEP kullanılmıştır. Pozisyonu ölçerken 2 kanalın düşen ve yükselen kenarı ölçülerek hassasiyet artırılmıştır.. Gerekliğinde enkoderden aldığımız sayısal verilerin tersi alınabilir. Her kanalın polarity kısmına tıkladığımızda gelen verinin tersi alınır.



Şekil 3.5 Simulinkte eQEP register ayarları

3.4 Motor Sürücüleri

VNH3SP30 entegresi pololunun tasarladığı 2 kanallı bir sürücü devresidir ve birinci ve ikinci eksenlerdeki motorlarda kullanılmıştır. Bu sürücü ile 9A akım sağlanabilmektedir fakat 10 KHz.'lik düşük PWM frekansı vardır. TB6612FNG sürücüsü, üçüncü eklemi hareket ettiren motorda kullanılmıştır. 3. eklemdaki motor, fazla torka ihtiyaç duymadığından daha düşük akım sağlayan bu sürücü yeterli olmaktadır.



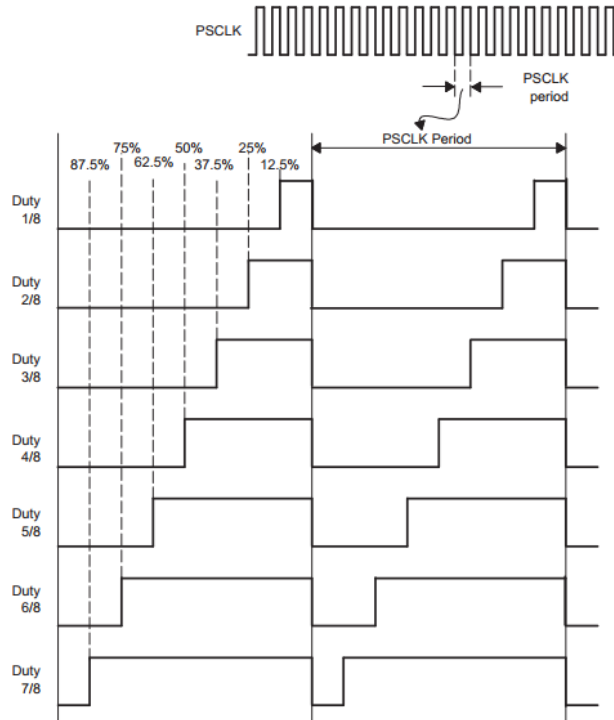
Şekil 3.6 Motor sürücüleri(Dual VN3SP30 motor driver carrier, bt; TB6612FNG motor driver carrier, bt)

Tablo 3.1 Kullanılan sürücülerin teknik verileri

	VN3SP30	TB6612FNG
Çalışma gerilimi	5,5 – 36 V	4,5 – 13,5 V
Maximum Tepe akımı	30 A	3 A
Maximum PWM frekansı	10 kHz	100 kHz
Devamlı Çalışabileceği maximum akım	9 A	1A

3.5 PWM

PWM sinyali aslında bir anahtarlama metodudur. ON ve OFF olma sürelerini ayarlayarak, motora verilen güç ayarlanabilir. Bir periyottaki ON olma yüzdesine Duty Cycle denir. Duty cycle yüksek olduğunda motora verilen güç de aynı oranda yüksektir. Duty Cycle'dan sonraki ikinci gözönüne alınması gereken parametre, sinyalin frekansıdır. Frekansın seçiminde motor sürücülerinin çalışma frekansları göz önüne alınmalıdır. Frekansın yüksek olması durumunda sürücünün kapasitans etkisinden dolayı ON-OFF anahtarlama yapılmasına rağmen sürekli ON konumunda kalabilir. PWM frekansının düşük olmasında ise sistemdeki ani değişikliklere cevap veremeyebilir ve titretişim yaratabilir.



Şekil 3.7 PWM sinyali duty cycle(TMS320x2833x ePWM module reference guide, 2009)

Kullanılan kontrolcü kartında 18 ePWM modülü vardır. ePWM modülünün frekansı, denklem (3.5) ve (3.6) 'da verildiği şekilde ayarlanmıştır.

$$PWM_T = \text{Timer period} * (6.67\text{-ns}) * \text{Cycle Time} * \text{Prescaler} \quad (3.5)$$

$$PWM_f = \frac{1}{PWM_T} \quad (3.6)$$

Kontrolcü ayarlarında timer periyodu 31250 ve prescaler 12 olarak seçildiğinden

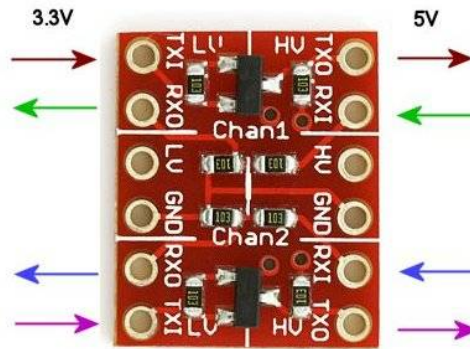
$$PWM_T=31250*6,66ns.12=2500000 \text{ ns.}=0,0025sn \quad (3.7)$$

$$PWM_f=\frac{1}{0,0025sn}=400hz. \quad (3.8)$$

olarak bulunmuştur.

3.6 Lojik Çevirici

Kontrolcü kartı 3,3V ile çalışmasına rağmen sürücü ve enkoderlerin giriş çıkış sinyalleri 5V'tur. Kullanılan lojik çevirici, kontrolcünden alınan 3.3 V değerindeki çıkış sinyalinin sürücüye 5V olarak gönderilmesini sağlar. Ayrıca enkoderden gelen pozisyon bilgisi içeren 5V değerindeki sinyali 3,3V'a düşürerek kontrolcü kartının zarar görmeden çalışmasını sağlar.



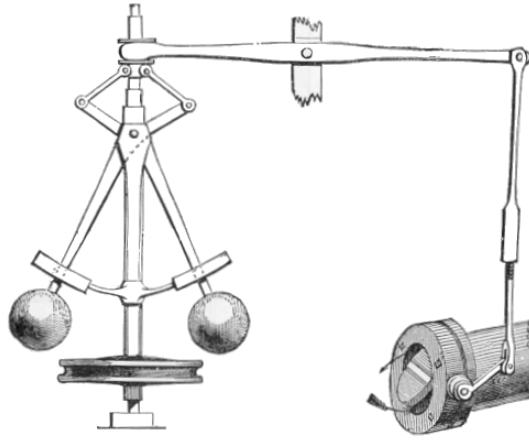
Şekil 3.8 Lojik çevirici(Logic level converter bi-birectional, bt)

BÖLÜM DÖRT

KONTROLCÜ TASARIMI

4.1 Giriş

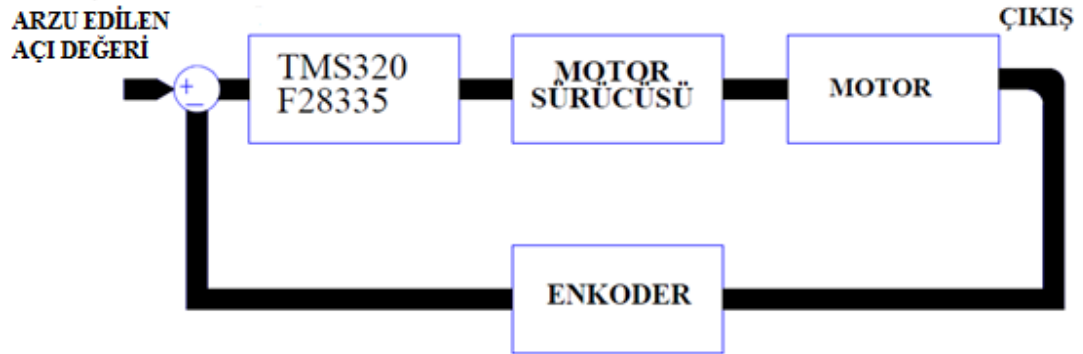
İnsanoğlu çok eskilerden beri kontrol sistemi tasarlamışlardır. Endüstride kontrolör tasarımı James Watt'ın 1769 tasarladığı toplu hız düzenleyicisi ile dönüm noktası olmuştur (Şekil 4.1). Bu düzenleyici topun hızına göre motora giden yakıtın vanasının açıklığını değiştirerek hız düzenlemesi yapar. Daha sonraları da Mekaniksel kontrolörler tasarlanmaya devam etti. Joseph Jacquard'ın tasarladığı dokuma tezgahında kartlarla dokumanın desenini girilebiliyordu. Bu kartlar deliklere sahipti. Bu deliklerin kombinasyonu dokuma bilgisini içeriyordu. Daha sonraları Mekanik kontrol sistemlerinin yerini transistörlerin gelişmesiyle mikrokontrolörler almaya başladı (Yüksel, 2005).



Şekil 4.1 James Watt'ın toplu hız düzenleyicisi(Centrifugal governor, bt)

Günümüzde birçok kontrol algoritmaları kullanılmaktadır (Kuo, 2002). Robotumuzda geri beslemeli bir kontrol algoritması kullanılmıştır. Geri beslemeli kontrol sisteminde çıkış değeri sensörler vasıtası ile sürekli ölçümlenir. Çıkışta ölçülen değerler ile istenilen değer arasında bir değişim olduğunda denetim organı/kontrolcü (TMS320F28335) denetim sinyali ile çıkıştaki değeri düzeltmeye

çalışır. Bu yüzden dışardan gelen bozucu etkilere karşı arzu edilen değerde denetlenen sistem (motor) çıkışını sağlamaya çalışır.



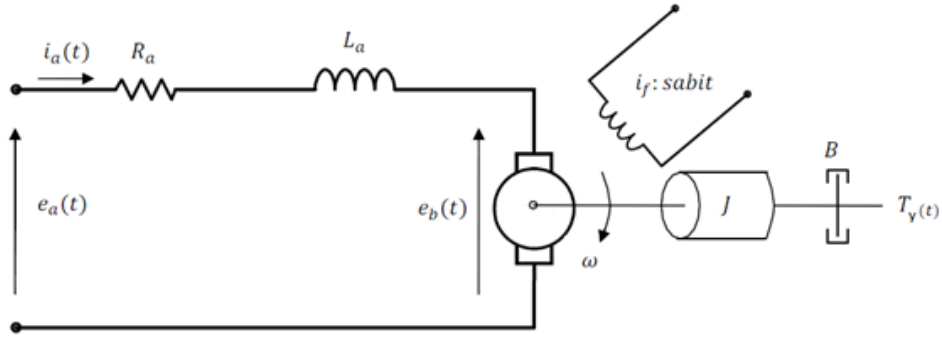
Şekil 4.2 Geri beslemeli motor kontrol şeması

Motorların açısal konum değişimleri, robotun son konumuna etki etmektedir. Bu nedenle motorların açısal pozisyon değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. DC motorun şaftına bağlanmış enkoder ile motorun şaftındaki açısal değişimler kontrol kartına (TMS320F28335) alınmıştır. Alınan bu değer istenilen açı değeri ile karşılaştırılmıştır. Enkoderden ölçülen değer ile arzu edilen değer arasındaki fark, hata sinyalini oluşturmaktadır. Oluşan bu hata sinyalinin işareti ve büyüklüğü kontrol algoritmasına giriş sinyali olarak girilmekte ve çıkışta sürücülerin girişi olan denetim sinyali üretilmektedir. Denetim sinyali, sürücünün motoru sürmesi için gerekli olan dönüş hızı ve yön bilgisine ilişkin olduğundan motor istenen konuma ulaşmaktadır.

İstenen geçici durum kriterlerine uygun, konumlama hatası az bir lam yükleyici sistemin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sistemin matematiksel modelinin tüm parametre değerleri ile birlikte bulunması sonrasında da uygun kontrolcünün tasarlanması gerçekleştirilmelidir. Bu amaca yönelik olarak öncelikle kullanılan motorların matematiksel modelleri oluşturulmuş ve Matlab Sistem Tanılama aracı ile parametre değerleri bulunmuştur. Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3 bu işlemlere yönelik ayrıntılı bilgi sunmaktadır. Bölüm 4.4 ve Bölüm 4.5’de ise kullanılan kontrolcü ve kontrolcü katsayılarının bulunması verilmiştir.

4.2 DC Motorun Matematiksel Modeli

Kullandığımız motorlar armatür denetimli motorlardır. Bu motorların eş değer devresinde (Şekil 4.3) elektriksel ve mekaniksel denklemler kullanıldığında giriş değişkeni olan gerilim ve çıkış değişkeni olan konum arasındaki matematiksel ilişki aşağıdaki verildiği şekilde bulunur:



Şekil 4.3 DC motorun eşdeğer devresi

Öncelikle zıt emk $e_b(t)$ ve tork $T_m(t)$ denklemleri denklem (4.1) ve denklem (4.2) 'de verildiği şekilde yazılır.

$$e_b(t) = K_b * w(t); \quad (4.1)$$

$$T_m(t) = K_m \cdot i(t) \quad (4.2)$$

Daha sonra Kirchoff yasasından yararlanarak denklem (4.3) elde edilir.

$$e_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b \quad (4.3)$$

DC motor eşdeğer devresine ilişkin mekaniksel denklem ise

$$T_m(t) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_y \quad (4.4)$$

'dir. Bu denklemlerin Laplace dönüşümleri alınırsa

$$e_a(s) = i_a(s)R_a + L_a i(s)s + e_b(s) \quad (4.5)$$

$$e_b(s) = K_b * s * \theta(t) \quad (4.6)$$

$$T_m(s) = K_m.i(s) \quad (4.7)$$

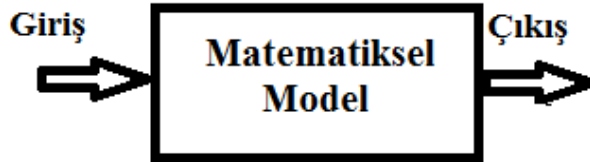
olarak bulunur. Mekaniksel denklemde yük sıfır olarak alınıp, sonra bozucu etki olarak eklenebildiğinden tork denklem (4.9) 'da verildiği şekilde yazılabilir.

$$T_m(s) = J\theta(s)s^2 + B\theta(s) \quad (4.8)$$

Bu durumda denklem (4.5), (4.6), (4.7) ve (4.8) denklemlerini kullanarak motorun gerilimi e_a ile açısı θ arasındaki transfer fonksiyonu denklem (4.9) 'da verildiği şekilde bulunur.

$$\frac{\theta}{e_a} = \frac{K_m}{s[L_aJs^2 + (L_aB + R_aJ)s + R_aB + K_mK_b]} \quad (4.9)$$

4.3 Matlab Sistem Tanılama Aracı ile Motor Modelinin Bulunması



Şekil 4.4 Matematiksel modelin giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi vermesi

Bu çalışmada, Matlab Sistem Tanılama Aracı, robot sisteminde kullanılan motorların matematiksel modelini bulmak için kullanılmıştır. Matematiksel modelin bulunması amacı ile sistem tanılama aracına, giriş değerleri, giriş değerlerine karşılık gelen çıkış değerleri ve matematiksel modele ilişkin kutup ve sıfır sayıları verilmektedir (Şekil 4.4). Bu çalışmada, DC motorunun konum kontrolü istenmekte olduğundan giriş sinyali, PWM sinyali ile kontrol edilen gerilim iken çıkış enkoderden alınan konum bilgisidir. Tanılama aracına veri girişi “import data” komutu çalıştırılarak yapılır. Gelen ekranda, giriş ve ilgili çıkış değerleri Matlab’in

Çalışma alanından aktarılır, örnekleme zamanı ve başlangıç zaman değerleri verilir (şekil 4.5).

şekil 4.5 Sistem tanılama aracında veri giriş ekranı

Sistem tanılama aracı, lineer, lineer olmayan ve süreç model gibi farklı modelleri tanılama özelliğine sahiptir. Bu çalışmada süreç modeli seçilmiş ve 2 kutuplu yapıya integral etki eklenerek denklem (4.10)’da verildiği şekilde bir model göz önüne alınmıştır. Burada bilinmeyen parametre değerleri, K , T_{p1} ve T_{p2} değerleridir. Bu değerler, giriş ve çıkış değerlerinin en iyileme algoritmasında kullanılması ile tahmin edilir.

$$\frac{K}{s(1+T_{p1}s)(1+T_{p2}s)} \quad (4.10)$$

En iyileme algoritmasının sonuçlarına göre 1. eksenindeki motorun transfer fonksiyonu,

$$\frac{0,0048227}{s(1+0,001s)(1+0,031485s)} = \frac{0,0048227}{0,003s^3+0,0325s^2+s} \quad (4.11)$$

2. eksenindeki motorun transfer fonksiyonu,

$$\frac{0,36587}{s(1+0,001s)(1+13,3977s)} = \frac{0,36587}{0,0134s^3+13,3987s^2+s} \quad (4.12)$$

3. eksenindeki motorun transfer fonksiyonu,

$$\frac{0,096294}{s(1+0,001s)(1+1,7321s)} = \frac{0,096294}{0,0017s^3+1,7331s^2+s} \quad (4.13)$$

şeklinde bulunmuştur.

4.4 PID Kontrolcü

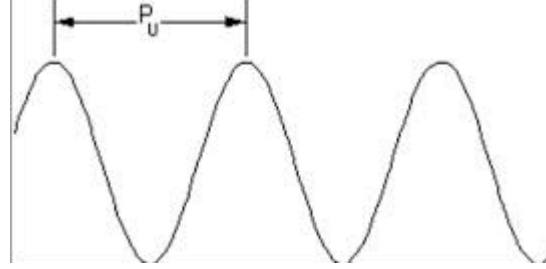
Denetim sistemi olarak yaygın ve efektif bir kontrol algoritması olan kapalı döngü PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol algoritması kullanılmıştır (Bingöl ve Küçük, 2008). Çıkış değeri olarak motor enkoderlerinden alınan konum bilgisi kullanılmış ve bu bilgi giriş referans değeri ile karşılaştırılmış, oluşan hata değerine göre PID kontrolöründen kontrol sinyali elde edilmiştir.

PID kontrolcünde üç denetim etkisi mevcuttur. Her denetim etkisinin ayrı görevleri vardır(Kuo, 2002). PID Kontrolcü tasarlanırken 3 denetim etkisinin de üstünlüklerinin kullanılması gerekmektedir. P etkisi hatayı belli katsayıyla çarpıp çıkışa verir. Basit oluşundan ve yükselme zamanını kısalttığı için tercih edilebilmektedir. Sadece P etki kullanıldığında sistem kalıcı-durum hatası verebilmektedir. Bir başka etki olan integral etkide (I) hata toplanarak çıkışa verilir. İntegral etkinin kullanılmasındaki amaç kalıcı-durum hatasını yok etmektir. Sistemin hatalara karşı daha hızlı cevap vermesi türev (D) etkinin görevidir. Orantı etki hata değişimlerine duyarsızdır. Bu duyarsızlığı türev etkiyle yok edip hatalar çok büyümeden sistemin parametreleri istenilen değerlerde tutulabilir.

4.5 PID Katsayılarının Bulunması: Ziegler ve Nichols Yöntemi

Kontrolcünün P, I ve D katsayılarını bulmak için deneysel bir yöntem olan Ziegler ve Nichols yöntemi uygulanmıştır (Yüksel, 2005). Bu yöntemde öncelikle PID kontrolcünde integral etki ve türev etki sıfırlanır ve orantı etki yavaş bir şekilde artırılmaya başlanır. Artırılma işlemi yapılırken verilen giriş değeri ve çıkış değeri

izlenir. Çıkış değeri giriş değeri çevresinde salınım yaptığı nokta kritik kararlı olduğu noktadır (Şekil 4.6). Kritik kararlı olduğu noktadaki orantı kazancı K_{pmax} ve salınım periyodu P_u olarak not edilir ve PID katsayıları bu değerlerin yardımı ile Tablo 4.1 de verilen bağlantıların kullanımı ile bulunur.



Şekil 4.6 Ziegler Nichols yönteminde P_u salınım periyodu

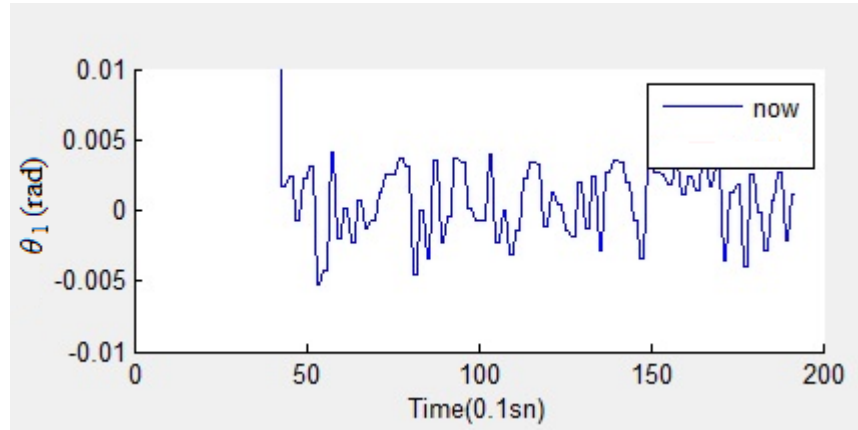
Tablo 4.1 Ziegler-Nichols yöntemi ile P, I, D katsayılarının ayarlanması

Ziegler-Nichols Yöntemi			
Kontrolör Tipi	K_p	K_i	K_d
P	$0,5 K_{pmax}$	-	-
PI	$0,45K_{pmax}$	$\frac{K_p}{P_u}$ 1.2	-
PD	$0,8K_{pmax}$	-	$\frac{K_p P_u}{8}$
PID	$0,6K_{pmax}$	$\frac{2K_p}{P_u}$	$\frac{K_p P_u}{8}$
PID (az maximum aşım)	$0,33K_{pmax}$	$\frac{2K_p}{P_u}$	$\frac{K_p P_u}{3}$
PID(maximum aşımsız)	$0,2K_{pmax}$	$\frac{2K_p}{P_u}$	$\frac{K_p P_u}{3}$

İntegral etki sistemimizin geçici durum davranışını bozmaktadır. Maximum aşımı artırmakta ve oturma zamanını uzatmaktadır. Fakat kalıcı durum hatasını sıfıra indirmektedir. Türev etki ise geçici durum davranışını kısaltmaktadır. Değişimlere hızlı cevap vermeyi sağlamakta maximum aşımı ise azaltmaktadır. Sistemimizde maximum aşım istenmediğinden maximum aşımsız PID kullanılmıştır.

4.5.1 Birinci Eksendeki PID Kontrolcünün Katsayılarının Ayarlanması

İlk eksenindeki motor, θ_1 hareketini sağlayan motordur. Ziegler-Nichols yöntemi gereğince integral ve türev katsayıları sıfır iken salınımlar $K_p=4$ iken gerçekleşmiştir (Şekil 4.7) 5 sn. ile 15 sn. arasındaki salınımların sayısı yaklaşık olarak 15 olduğundan P_u değeri yaklaşık olarak 0,67 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7 İlk eksenindeki motorda $K_p=4$ değerinde olduğunda meydana gelen salınımlar

Bu durumda Tablo 4.1 'e göre PID kontrolcümüz için K_p , K_i ve K_d değerleri,

$$K_p = 0,2K_{pmax} = 0,2 * 4 = 0,8$$

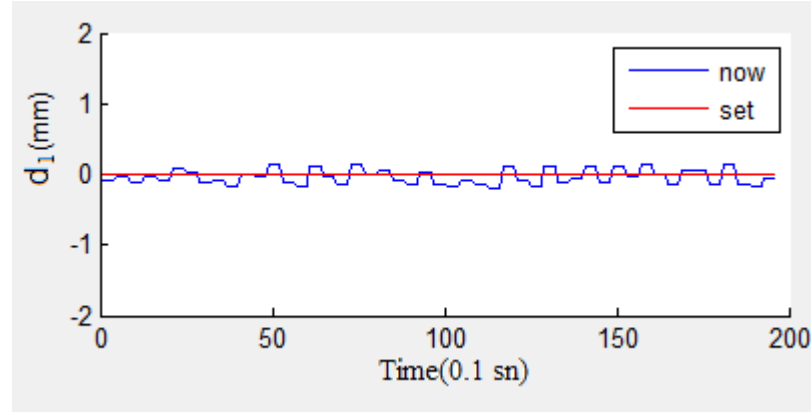
$$K_i = \frac{2K_p}{P_u} = \frac{2*0,8}{0,67} = 2,3$$

$$K_d = \frac{K_p P_u}{3} = \frac{0,8*0,67}{3} = 0,18$$

olarak bulunmuştur.

4.5.2 İkinci Eksendeki Kontrolcünün Katsayılarının Ayarlanması

İkinci eksenindeki motor, d_1 hareketini sağlayan motor. K_p değeri 8 yapıldığında açısız değerinde salınımlar meydana geldiğinden bu değer K_{pmax} değeri olarak alınmıştır. 0 sn. ile 20 sn. arasındaki salınımların sayısı 19 adet olduğundan P_u değeri yaklaşık olarak 1,05 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8 İkinci eksenindeki motorda $K_p=8$ değerinde olduğunda meydana gelen salınımlar

Bu durumda Tablo 4.1 'e göre ikinci eksenindeki PID kontrolcü için K_p , K_i ve K_d değerleri,

$$K_p = 0,2K_{pmax} = 0,2 * 8 = 1,6$$

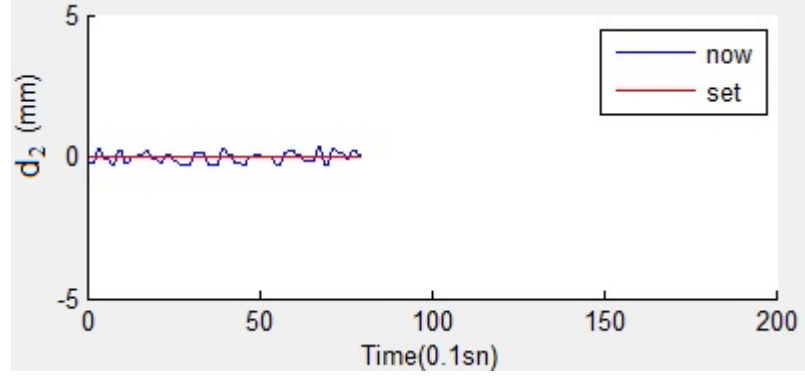
$$K_i = \frac{2K_p}{P_u} = \frac{2*1,6}{1,05} = 3,04$$

$$K_d = \frac{K_p P_u}{3} = \frac{1,6*1,05}{3} = 0,56$$

olarak bulunmuştur.

4.5.3 Üçüncü Eksendeki Kontrolcünün Katsayılarının Ayarlanması

İkinci eksenindeki motor, d_2 hareketini sağlayan motordur. K_p değeri 8 yapıldığında açılal değerde salınımlar meydana geldiğinden bu değer K_{pmax} değeri olarak alınmıştır (Şekil 4.9). 0 sn. ile 5 sn. arasındaki salınımların sayısı yaklaşık 6 olduğundan P_u değeri 1,2 olarak alınmıştır.



Şekil 4.9 Üçüncü eksenindeki motorda $K_p=8$ değerinde olduğunda meydana gelen salınımlar

Bu durumda Tablo 4.1 'e göre üçüncü eksenindeki PID kontrolcü için K_p , K_i ve K_d değerleri,

$$K_p = 0,2K_{pmax} = 0,2 * 8 = 1,6$$

$$K_i = \frac{2K_p}{P_u} = \frac{2*1,6}{1,2} = 2,6$$

$$K_d = \frac{K_p P_u}{3} = \frac{1,6*1,2}{3} = 0,64$$

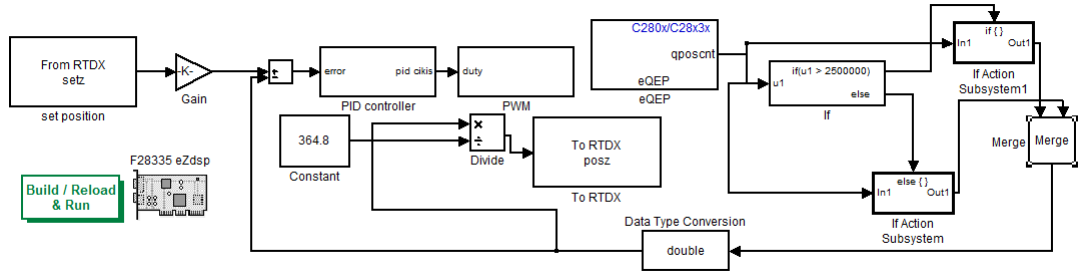
olarak bulunmuştur.

BÖLÜM BEŞ

MATLAB SIMULINK ORTAMINDA SİSTEMİN GERÇEKLENMESİ

5.1 Simulink Modeli

Robot kontrolü yapılırken ilgili yazılım, kullanılan kontrolcü kartına ilişkin TI Code Composer Studio ortamında değil Matlab Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve Matlab araçları kullanılarak C koduna otomatik çevrilerek Code Composer Studio ortamına aktarılmıştır (MATLAB, 2010b).



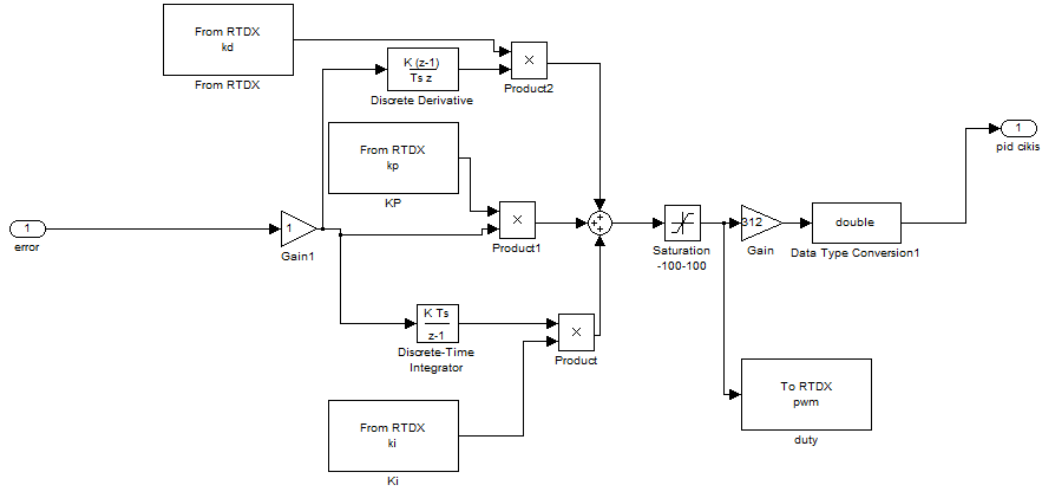
Şekil 5.1 Simulink DC motor kontrol modeli

Lam yükleyicide kullanılan DC motor için Simulink ortamında hazırlanan kontrol modeli Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Bilgisayarla veri alışverişi için kontrolcü kartının RTDX modülü kullanılmıştır. RTDX’den pozisyon değeri alınarak enkoderden gelen değer ile karşılaştırılmış, aradaki fark değeri PID kontrolcünün girişine verilmiştir. Hata değerinin büyüklüğüne göre DC sürücüye uygun PWM sinyali ve yön bilgisi oluşturulmuştur.

5.1.1 PID Kontrolcü Tasarımı

Şekil 5.2’de sistemim PID algoritması verilmiştir. PID katsayıları, hazırlanan grafik arayüzü GUIDE’den girilmektedir. Şekil 5.1’de gösterilen hata değeri girişten alınır ve arayüz GUIDE’da kullanıcı tarafından verilebilen P, I, D katsayıları ile oransal, integral etki, türevsel etki oluşturulur. Toplam etki saturasyon fonksiyonuna uygulanır. Saturasyon uygulanmasının nedeni çıkan sonucun %100’ü geçmemesini

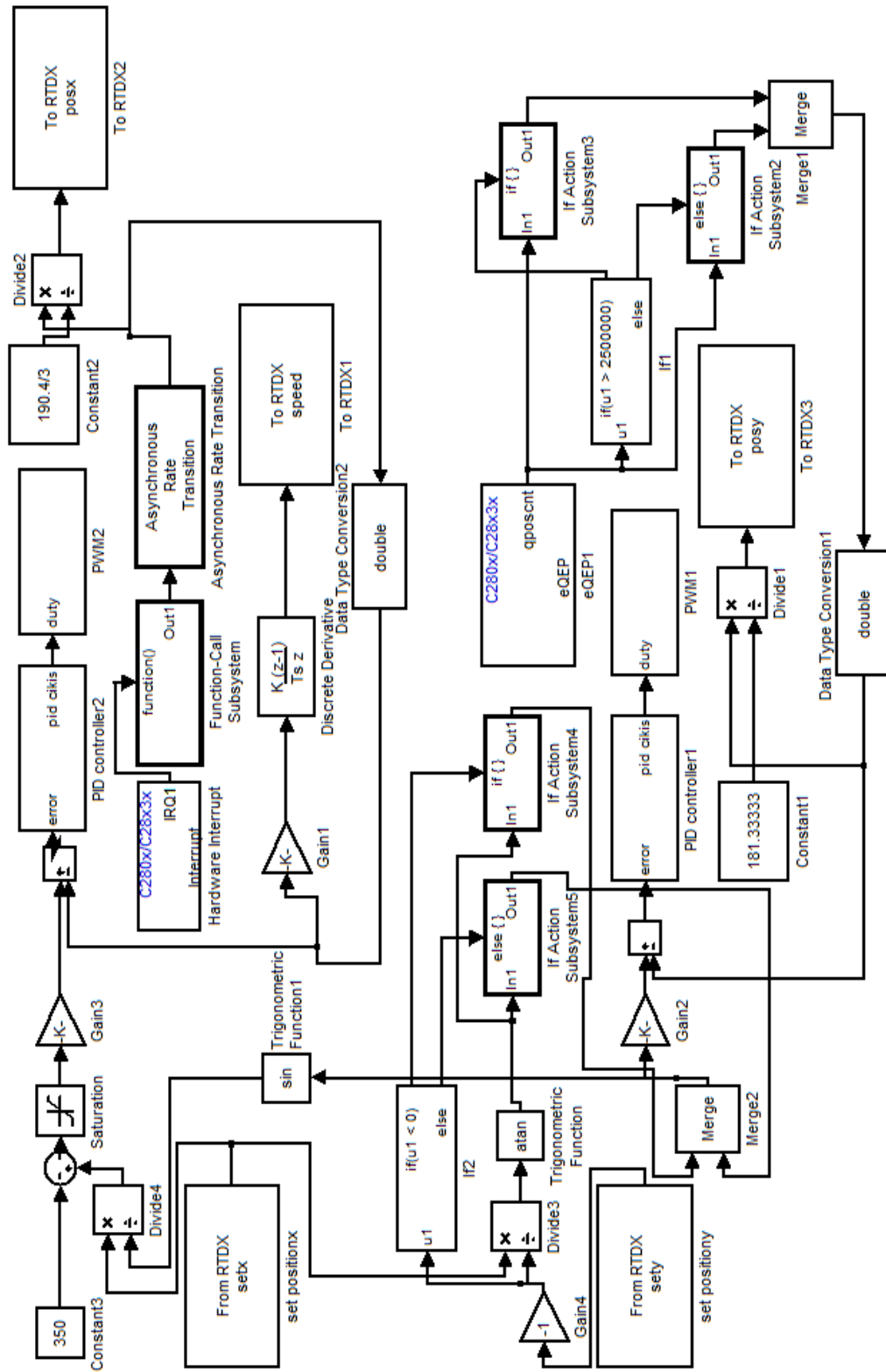
sağlayarak PWM sinyalinin -100 ile 100 arasında olmasını garantilemektir. Saturasyon fonksiyonu sonucunun 312 kazanç değeri ile çarpılmasının nedeni kontrolcü kartının ePWM değerinin 0-31200 aralığına ayarlanmış olmasıdır.



Şekil 5.2 PID kontrol algoritmasının simulink modeli

5.1.2 Simulink Modeline Ters Kinematik Hesaplamalarının Eklenmesi

Kullanıcı arayüzü GUIDE'dan alınan varılması istenen konumun x, y ve z koordinatları, RTDX kanalı ile kontrolcü kartına aktarılmıştır. Ters kinematik hesaplamaları ve kontrol algoritmalarının C kodları Şekil 5.3'de verilen simulink modeli yardımıyla Code Composer Studio programına aktarılmıştır (MATLAB, 2010b).



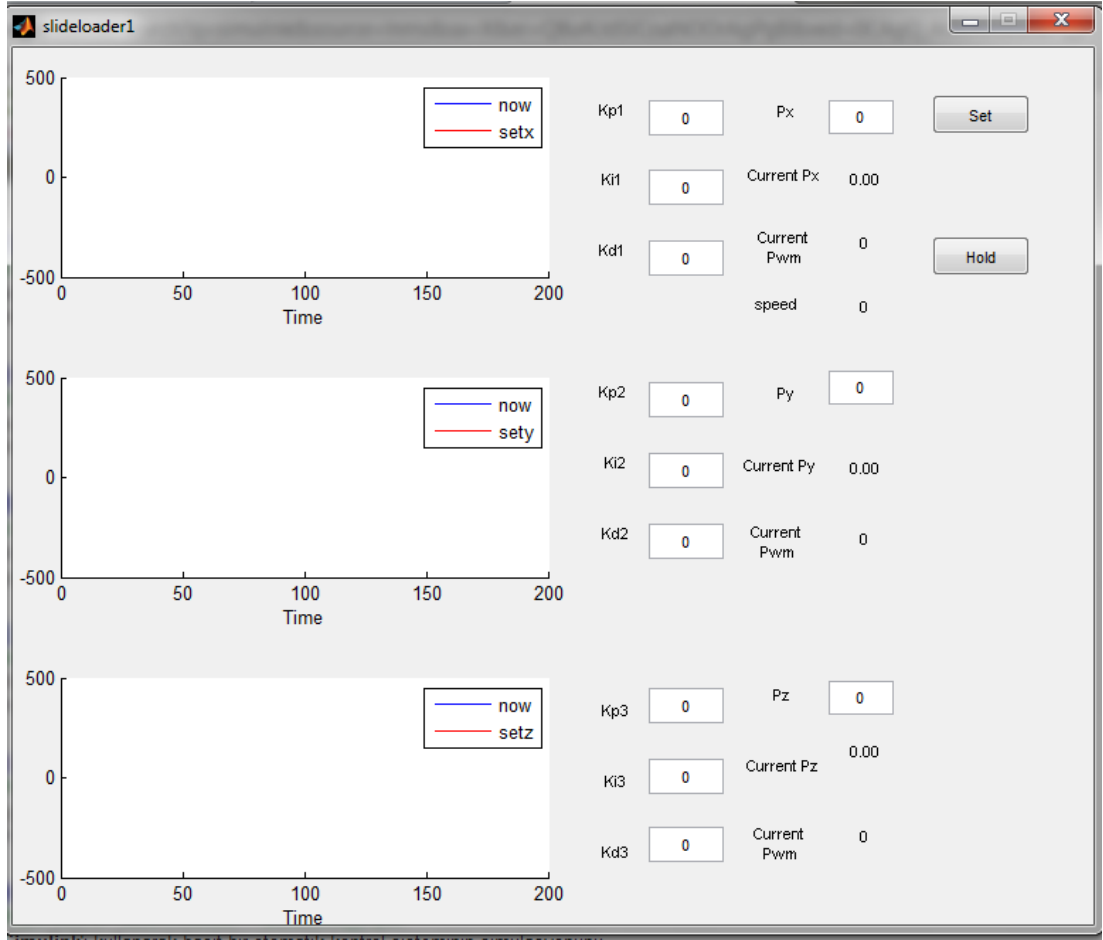
Şekil 5.3 X ve Y eksenindeki ters kinematik hareketinin simulink modeli

5.2 M-File Komut Dosyası

M-file komut dosyası Guide'mızın arka kısmında çalışan kod dosyasıdır. Kod yazımı C diline benzemekte ve M-File dosyasında yazılan kodlarla CCS çalıştırılmakta, simulink modelleri CCS'e rahatlıkla aktarılabilir. M-file, komut dosyası Guide'da bulunan görsel elemanlardan (textbox, axes, slider vb.) alınan veya gönderilen verilerin gerekli yerlerde kullanılabilmesini sağlar. Kontrolcü kartının haberleşmesini sağlayan RTDX ayarları bu dosya ile gerçekleştirilir ve RTDX kanallarından gelen veriler burada alınır ve gönderilir. İlgili veriler, gerçek zamanlı grafiksel olarak gösterilir veya daha sonra kullanılmak üzere saklanır.

5.3 Kullanıcı Arayüzü

Şekil 5.4'de lam yükleyici robotun motor kontrolü için hazırlanmış olan kullanıcı arayüzü verilmiştir. Motorların konum kontrolü için P, I, D katsayıları ve set değeri ayarları maximum aşım, yükselme zamanı, oturma zamanı ve kalıcı durum hatalarını en azlayacak şekilde ayarlandı. Şekil 5.4'teki grafikler sırasıyla uç işlevcinin x, y ve z koordinatlarındaki konumlarını göstermektedir. Grafiklerde hem set değerleri hem de ölçülen değerler görülebilmektedir.

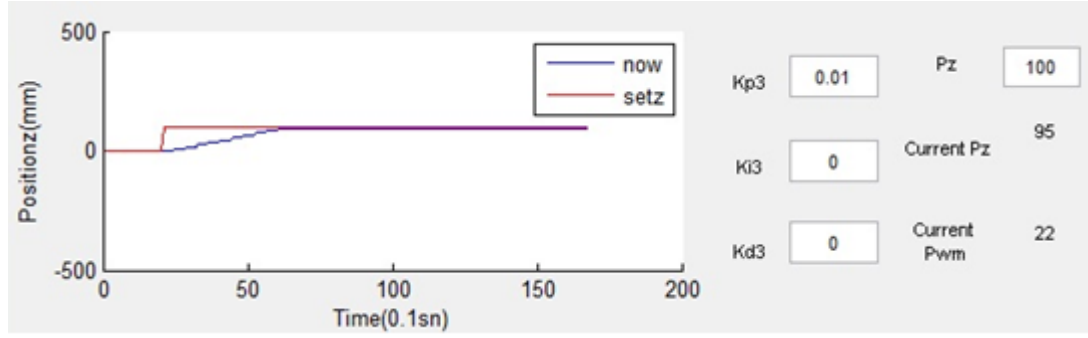


Şekil 5.4 Matlab kullanıcı arayüzü görüntüsü

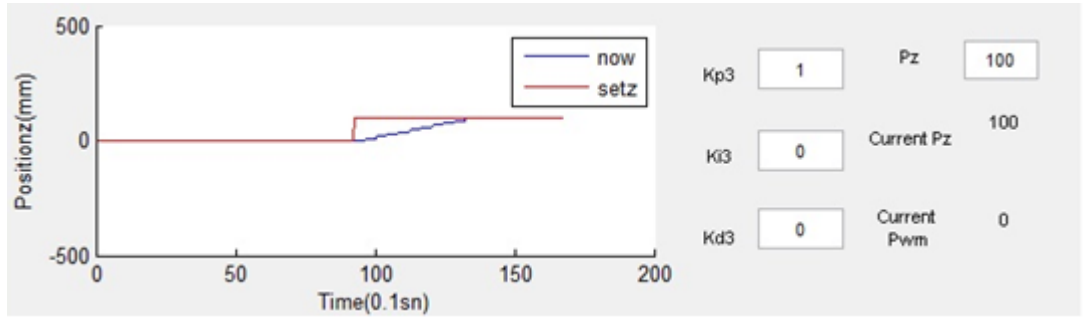
5.4 Sonuçlar

5.4.1 Z Ekseninde Hareketin İncelenmesi

Şekil 5.5’de Z-eksenindeki referans/set pozisyonu, 0mm.’den 100mm konumuna ulaşmak üzere ayarlandı. Motorun kontrolünde integral etki ve türev etki kullanılmadığında sistemin cevabı arzu edilen değere yaklaştığı gözlemlendi. Fakat %3’lük bir kalıcı hata sistemde görüldü. Bu hata payının görülmesinin nedeni hatanın küçülmesinden dolayı kontrolörden çıkan denetim sinyalinin zayıflığından kaynaklanmaktadır.

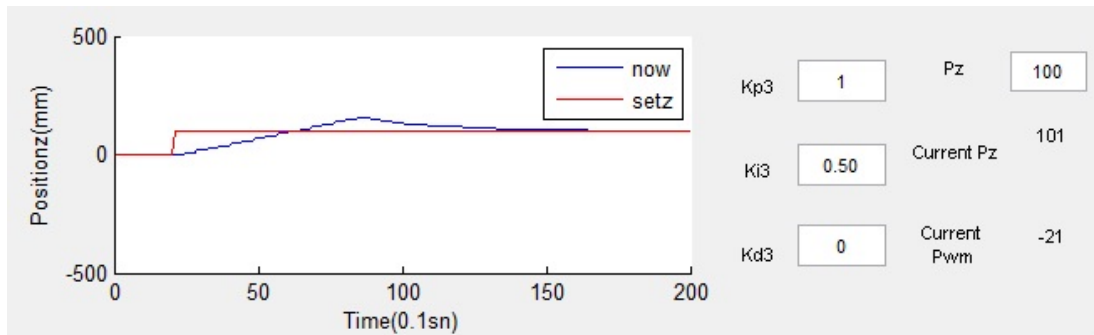


Şekil 5.5 Z eksen konumlama davranışı ($P = 0,01$)



Şekil 5.6 Z eksen konumlama davranışı ($P = 1$)

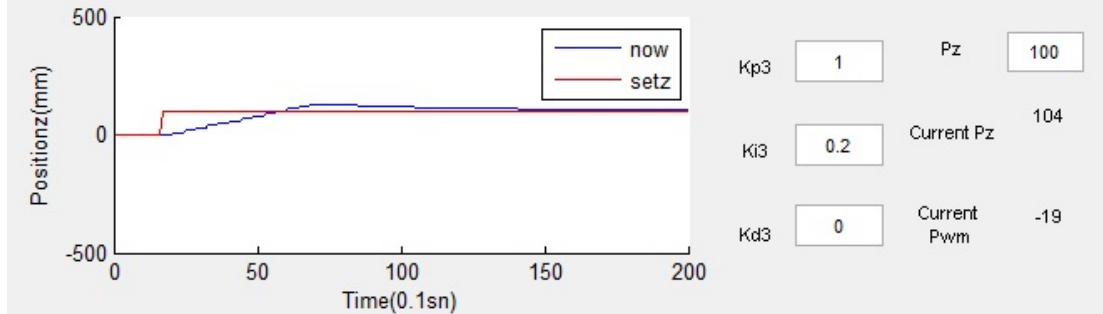
Hata oranını azaltmak için P katsayısı artırıldı. Bu sayede hata bandında azalma gözlemlendi ayrıca arzu edilen konuma daha hızlı ulaşıldı. P katsayısını aşırı artırılması küçük hatalara karşı motorun tepkisini artırdığı için motorda düzensiz hareketlerin oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 5.7 Z eksen konumlama davranışı ($P = 1, I = 0,5$)

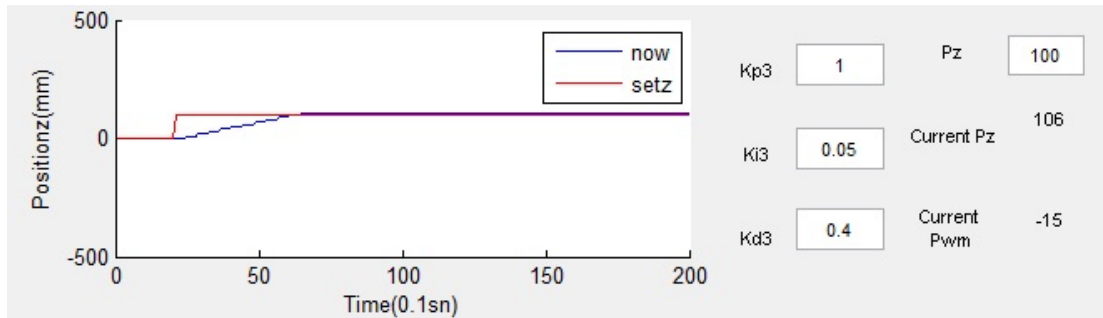
Kontrolöre integral etki eklenmesiyle sistemin geçici durum süresinde uzama dolayısı ile cevap hızında azalma gözlenmiştir. Fakat kalıcı durum hatası sıfır olup, istenen pozisyona ulaşılması sağlanmıştır. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi maximum

aşım %60 civarındadır. Bu değer fazla yüksek bulunduğundan integral etkinin azaltılması gerekmektedir.



Şekil 5.8 Z eksen konumlandırma davranışı (P= 1, I=0,2)

İntegral etki azaltıldığında beklendiği gibi maximum aşımında azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.8). Sistemde maximum aşım, orantı(P) etki azaltılarak veya türev(D) etki artırarak da başarılabilmektedir.



Şekil 5.9 Z- eksen konumlandırma davranışı (P= 1, I=0,05, D= 0,4)

Türev(D) etki hatanın değişimini alarak denetim sinyaline etki eder. Hatanın sabit olması durumunda etkisi sıfırdır. Türev etki sistemin cevap hızını artırmış ve maksimum aşımın artmamasına yol açmıştır (Şekil 5.9).

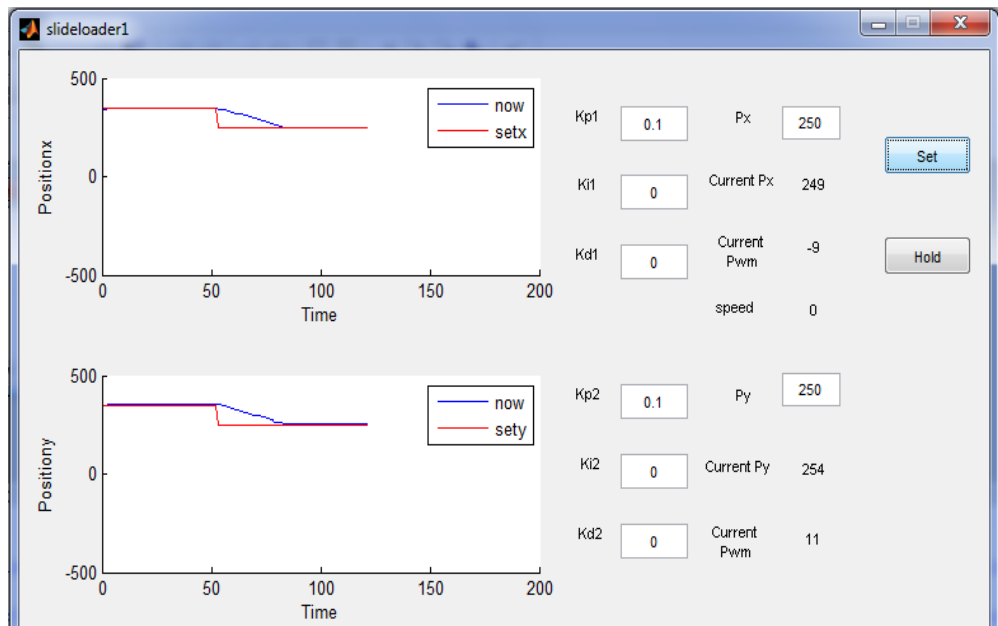
Tablo 5.1 Z ekseninde verilen komutla Gerçekte Ölçülen Değerlerin Karşılaştırması

Set Z değeri	Ölçülen Değer	% Hata
20mm	20,1mm	0,5
40mm	40,5mm	1,25
60mm	60,6mm	1
80mm	81mm	1,25
100mm	101,2mm	1,2

Robotun Z eksenindeki hareketinin doğruluğunu ölçmek için çeşitli deneyler yapılmış ve kumpasla yapılan ölçümlerde robotun z ekseninde varması istenen set değerine %0.5 ile %1.2 hata payı ile ulaştığı görülmüştür (Tablo 5.1).

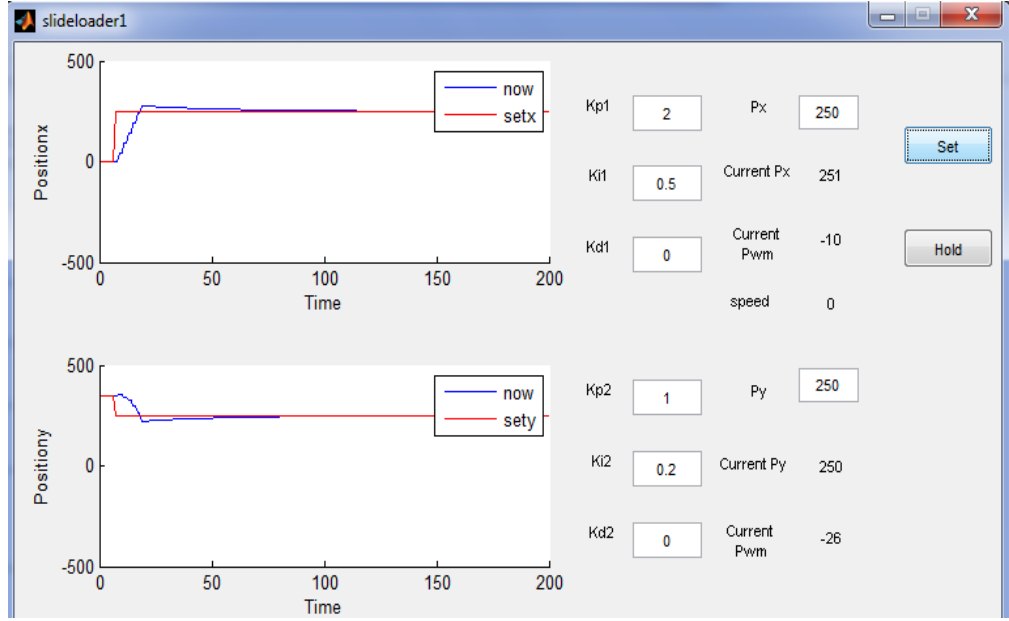
5.4.2 X ve Y Ekseninde Hareketin İncelenmesi

X ve Y koordinatı, 1. eksenindeki ve 3. eksenindeki hareketi sağlayan motorların meydana getirdiği konumlara bağlıdır.



Şekil 5.10 X ve Y koordinatları konumlama davranışı (P=0,1)

İlk konum olarak X ve Y koordinatları 350 mm. olarak seçildi. İstenen konum olarak X ve Y koordinatlarına 250mm verildiğinde Şekil 5.10'daki sonuçlar elde edildi. Grafiğe göre X ekseninde %1'lik ve Y ekseninde %4 'lük hata payı görüldü.



Şekil 5.11 X ve Y koordinatları konumlama davranışı I (P=1, I=0,2)

X ve Y eksenlerinde kalıcı durum hatası olması nedeniyle, motorların kontrolörüne integral etki eklendi. İntegral etki eklememiz hatayı azaltmış ama maximum aşımı artırmıştır (Şekil 5.11).

Tablo 5.2 X ve Y ekseninde verilen komutla gerçekte ölçülen değerlerin karşılaştırması

Verilen X değeri	Verilen Y değeri	Ölçülen X değeri	Ölçülen Y değeri	% HATA
350mm	350mm	352mm	349mm	%0,57-0,28
250mm	300mm	251,5mm	299mm	%0,6-0,33
300mm	250mm	302mm	249.5mm	%0,67-0,2
300mm	350mm	303mm	347mm	%1-0,85

Tablo 5.2’de verilen set değeri ve ölçülen çıkış değerleri verilmiştir. Oluşan hatalar X-ekseni yönünde %0,5 - %1 aralığında ve Y eksenini yönünde %0,2 -%0,85 aralığında değişmektedir. Bu hataların sensörlerin hassasiyet eksikliğinden ve dişliler arasındaki boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE GÖZLEMLER

Bu çalışmada, otomatik lam yükleyicisi robotun sistemin mekanik ve elektronik tasarımı yapılarak entegrasyon gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan robot, silindirik düzenleme sahip, ilk eklemi dönel, ikinci eklemi birinci ekleme paralel ve prizmatik, üçüncü eklemi ise ikinci ekleme paralel ve prizmatiktir. Döner olan ilk ekseninde sonsuz vida-dişli sistemi tercih edilmiş olup diğer iki ekseninde ise motordan gelen döner hareket doğrusal harekete bilyalı vida sistemi ile çevrilmiştir.

Denetim sistemi olarak yaygın ve efektif bir kontrol algoritması olan kapalı döngü PID kontrol algoritması kullanılmıştır. Çıkış değeri olarak motor enkoderlerinden alınan konum bilgisi kullanılmış ve bu bilgi giriş referans değeri ile karşılaştırılmış, oluşan hata değerine göre PID kontrolöründen kontrol sinyali elde edilmiştir. TI F28335(DSP) kontrol kartı kullanılarak PID kontrolcü ve diğer ilgili giriş çıkış sinyalleri elde edilmiştir. F28335'in uygun çevre birimleri sayesinde enkoder ve motordan alınan veri, hazırlanan programın kullanıcı arayüzüne gönderilmiştir. Programlama ortamı olarak Matlab Simulink ortamı seçilmiştir. Böylelikle, kod yazımı yerine daha görsel blok yapılar üzerinde yazılım oluşturulmuş daha kısa zamanda karmaşık kodların yazılmasına olanak sağlanmıştır

Gerekli tork ve hız ayarlarına göre sisteme dişli takımları ilave edilmiştir. Hassas konumlama elde edebilmek için dişli takımları arasındaki boşluklar azaltılmaya çalışılmakla beraber hiç boşluk kalmayacak şekilde ayarlama yapıldığında dişlilerin kilitlendiği ve motorların zorlandığı görülmüştür.

Mekanizmamızın uç işlevcisinin konumu verilir, verilen konuma göre motorların hareket miktarı, ters kinematik ve dişli denklemleri ile hesaplamıştır ve uç işlevcisinin verilen konumuna ulaşma davranışı incelenmiştir. P, I, D katsayılarının etkileri araştırılmış ve ilgili sonuçlar alınmıştır. İntegral etki, kalıcı durum hatasını yok etmesine karşılık sistemin geçici durum davranışında olumsuz etkiler meydana getirmiştir. Maximum aşım ve oturma zamanının uzamasına neden olmuştur. Orantı

etki ile türev etkiyi kullandığımızda ise sistemin geçici durum davranışında iyileşme görülmüştür. Fakat kalıcı durum hatasında artışlar meydana gelmiştir.

İstenen konum ve ulaşılan konum değerleri karşılaştırıldığında yapılan hatanın %2 değerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Hatanın daha da azaltılabilmesi için mekanik düzenlemenin yanısıra iç döngü ile hız kontrolünün de yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir. Böylelikle, sistemde kalkış ve duruş anlarında gözlemlenen titreşimler azaltılabilecektir. Ayrıca, sisteme, girişin tek bir uç konum değeri şeklinde değil, konum listesi şeklinde girilebilir olmasının eklenmesi kullanım performansını artıracaktır.

KAYNAKLAR

Alvarez-Ramirez, J., Kelly, R. ve Cervantes, I. (2010). Semiglobal stability of saturated linear PID control for robot manipulators, *Automatica*, 39, 989-995.

Arimoto, S. (1995). Fundamental problems of robot control: Part I, Innovations in the realm of robot servo-loops, *Robotica*, 13(1), 19–27.

Baş, G. ve Demir, G. K. (2010). Sinc interpolating stitching for virtual microscopy. approach to sub-pixel image *Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT), 2010 15th National*, 1-4.

Bingül, Z. ve Küçük, S. (2005). *Robot tekniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Bingül, Z. ve Küçük, S. (2008). *Robot dinamiği ve kontrolü*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Centrifugal governor (bt). 12 Aralık 2012, http://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor

Craig, J. J.(1989). *Introduction to robotics mechanic and control*. Boston:Addison Wesley.

Delfino experimenter kit (bt). 15 Mayıs 2011, <http://e2e.ti.com/group/universityprogram/educators/w/wiki/2075.delfino-experimenter-kit.aspx>

Dual VNH3SP30 motor driver carrier (bt). 22 Mart 2010, <http://www.pololu.com/product/707>

Ferraira, R., Moon B., Humphries, J., Sussman, A., Saltz, J., Miller, R. ve diğer (1997). *The virtual microscope. Proceeding AMIA Annual Fall Symposium.*, 449-453.

Fontelo, P., Dinino, E., Johansen, K., Khan, A. ve Ackerman, M. (2005). Virtual Microscopy: Potential Applications in Medical Education and Telemedicine in Countries with Developing Economies. *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences.*

Kuo, B. (2002). *Otomatik kontrol sistemleri* (7.Basım). İstanbul: Literatür Yayıncılık.

Lewis, F.L., Dawson, D.M. ve Abdalla, C.T. (2004). *Robot Manipulator control:theory and practice*, (2nd edition), New York: Marcel Dekker

Logic level converter bi-birectional (bt). 18 Mayıs 2012, <https://www.sparkfun.com/products/12009>

Lundin, M., Lundin, J. ve Isoal, J.(2004). Virtual microscopy, *Journal of Clinical Pathology* 57, 1250–1251.

MATLAB Release 2010b (2010). The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

Mendi, F. (1999). Bilyalı vida-Somun sistemlerinin, autolisp Yardımıyla autocad ortamında tasarımı, *Nigde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 1-13

Metal gearmotor (bt). 2 Şubat 2012, <http://www.pololu.com/product/1442>

Motor feedback options (2010). 18 Ocak 2011, <http://www.parkermotion.com/dmxreadyv2/blogmanager/blogmanager.asp?post= motor-feedback-options>

Ortega, R., Loria, A. ve Kelly, R. (1985). A Semiglobally stable output feedback PID regulator for robot manipulators, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(0), 1432-1436

Parra-Vega V., Arimoto S., Liu, Y.H., Hirzinger, G. ve Akella P. (2003). Dynamic sliding PID control for tracking of robot manipulators: theory and experiments, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(6), 967-976

PlateCrane EX Overview (bt). 12 Ekim 2011, <http://www.hudsonrobotics.com/products/microplate-handling/platecrane-ex/#Overview>

Sandin, P.E. (2003). *Robot mechanisms and mechanical devices*. NY: McGraw-Hill companies.

Servo motor glossary of terms (bt). 5 Haziran 2012, <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/servo-motor-glossary.html>

Spong, M.W., Hutchinson, S. ve Vidyasagar, M. (2005). *Robot modeling and control*. Canada: John Wiley & Sons Inc..

Sun, D., Hu S., Shao X., ve Liu C. (2009). Global stability of a saturated nonlinear PID controller for robot manipulators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(4), 892-899.

TB6612FNG dual motor driver carrier, (bt). 21 Mart 2012, <http://www.pololu.com/product/713>

TMS320F28335 Digital signal controllers (DSCs) data manual (2007). 20 Ağustos 2011, <http://www.ti.com/lit/ds/sprs439m/sprs439m.pdf>

TMS320x2833x *ePWM module reference guide* (2009). 22 Temmuz 2012,
<http://www.ti.com/lit/ug/sprug04a/sprug04a.pdf>

TMS320x2833x *eQEP module reference guide* (2008). 12 Ağustos 2012,
<http://www.ti.com/lit/ug/sprug05a/sprug05a.pdf>

Xie M. (2003). *Fundamentals of robotics*. Singapore:World Scientific.

Yüksel, İ. (2005). *Otomatik kontrol sistem dinamiği ve denetim sistemleri*.
Bursa:VİPAŞ.